

**COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS HEURÍSTICO, ESTADÍSTICO  
UNIVARIADO Y ESTADÍSTICO BIVARIADO, PARA LA ZONIFICACIÓN DE  
AMENAZAS POR MOVIMIENTOS EN MASA A ESCALA 1:25.000 EN EL  
MUNICIPIO DE SANTA BÁRBARA, DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA.**

**PROYECTO DE GRADO**

**Para optar por el título de Geólogo**

**Autor:**

MILENA GONZÁLEZ GÓMEZ

**Asesor:**

MARCO FIDEL GAMBOA

MEDELLÍN

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA

UNIVERSIDAD EAFIT

2015





## CONTENIDO

INTRODUCCION .....	1
HIPÓTESIS .....	2
PREGUNTA DE TRABAJO.....	2
PROBLEMA DE TRABAJO.....	2
1.    OBJETIVOS.....	3
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	3
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
2.    METODOLOGIA .....	4
3.    CONCEPTUALIZACION .....	6
3.1 SUSCEPTIBILIDAD .....	6
3.2 AMENAZA.....	6
3.3 MOVIMIENTOS EN MASA.....	7
3.3.1 TIPOS DE MOVIMIENTOS .....	7
3.4 METODOS DE ZONIFICACIÓN.....	10
3.4.1 MÉTODO HEURÍSTICO.....	11
3.4.2 METODO ESTADÍSTICO UNIVARIADO .....	12
3.4.3 METODO ESTADÍSTICO BIVARIADO .....	13
4.    INSUMOS BÁSICOS.....	15
4.1 BASE CARTOGRÁFICA .....	15
4.2 DEM - MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN.....	16
4.3. MODELO DE SOMBRAS.....	18
4.3. SENSORES REMOTOS.....	19
5.    GENERALIDADES DEL AREA DE ESTUDIO .....	22
5.1 LOCALIZACIÓN .....	22
5.2 ESTUDIOS ANTERIORES.....	23



5.3	CLIMA .....	24
5.3.1	BOSQUE SECO TROPICAL (BST):.....	24
5.3.2	BOSQUE MUY HUMEDO PREMONTANO (bmhPM):.....	24
5.3.3	BOSQUE MUY HUMEDO MONTANO BAJO (BMHmb): .....	25
5.4	SUELOS .....	25
5.4.1	ASOCIACIÓN SANTA BÁRBARA (SB) .....	25
5.4.2	ASOCIACIÓN GEMELOS (GA).....	25
5.4.3	ASOCIACIÓN ITUANGO (IT) .....	26
5.4.4	ASOCIACIÓN ANGELOPOLIS (AE) .....	26
5.4.5	ASOCIACIÓN HORIZONTES (HB).....	27
5.5	MARCO GEOLOGICO REGIONAL .....	27
5.6	MARCO ESTRUCTURAL REGIONAL.....	29
5.6.1	PLEGAMIENTOS .....	31
5.7	MARCO GEOMORFOLOGICO REGIONAL.....	32
5.7.1.	SUPERFICIE DE EROSIÓN BELMIRA - SAN MIGUEL - SONSÓN .....	33
5.7.2	CAÑÓN DEL RÍO CAUCA-SAN JUAN .....	33
5.7.3	FRENTE EROSIVO DEL RÍO ARMA.....	34
6.	VARIABLES PARA LA ZONIFICACION DE AMENAZAS.....	36
6.1	VARIABLES MORFOMÉTRICAS .....	36
6.1.1	PENDIENTES .....	36
6.1.2	CURVATURA.....	38
6.1.3	RUGOSIDAD .....	40
6.1.4	RELIEVE RELATIVO.....	42
6.2	GEOLOGÍA LOCAL.....	44
6.2.1	UNIDADES LITOLÓGICAS .....	45
6.2.2	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL.....	56
6.3	GEOMORFOLOGÍA LOCAL .....	57
6.3.1	AMBIENTE DENUDACIONAL .....	59

6.3.2 AMBIENTE ESTRUCTURAL.....	63
6.3.3 AMBIENTE FLUVIAL.....	82
6.4 COBERTURAS .....	87
7. MOVIMIENTOS EN MASA.....	93
7.1 DESLIZAMIENTOS: SUBTIPO TRASLACIONAL.....	95
7.2 DESLIZAMIENTOS: SUBTIPO ROTACIONAL.....	97
7.3 FLUJOS: FLUJOS DE TIERRA.....	99
8. SUSCEPTIBILIDAD .....	101
8.1 SUSCEPTIBILIDAD CON EL MÉTODO HEURÍSTICO .....	101
8.1.1 SUSCEPTIBILIDAD POR DESLIZAMIENTOS.....	101
8.1.2 SUSCEPTIBILIDAD POR FLUJOS .....	104
8.2 SUSCEPTIBILIDAD CON EL MÉTODO ESTADÍSTICO UNIVARIADO.....	107
8.2.1 SUSCEPTIBILIDAD POR DESLIZAMIENTOS.....	108
8.2.2 SUSCEPTIBILIDAD POR FLUJOS .....	111
8.3 SUSCEPTIBILIDAD CON EL MÉTODO ESTADÍSTICO BIVARIADO.....	113
8.3.1 SUSCEPTIBILIDAD POR DESLIZAMIENTOS.....	114
8.3.2 SUSCEPTIBILIDAD POR FLUJOS .....	116
9. DETONANTES .....	120
9.1 DETONANTE LLUVIA .....	120
9.2 DETONANTE SÍSMO .....	121
10. COMPARACIÓN DE LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS PARA CADA PERÍODO DE RETORNO CON LOS DIFERENTES MÉTODOS DE ZONIFICACIÓN.....	124
10.1 AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS - $Tr=25$ AÑOS .....	125
10.2 AMENAZA POR FLUJOS - $Tr=25$ AÑOS .....	126
10.3 AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS - $Tr=50$ AÑOS .....	128
10.4 AMENAZA POR FLUJOS - $Tr=50$ AÑOS .....	129
10.5 AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS - $Tr=100$ AÑOS .....	131
10.6 AMENAZA POR FLUJOS - $TR=100$ AÑOS .....	132
11. ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS CON EL MÉTODO ESTADÍSTICO BIVARIADO .....	135

11.1 AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS .....	136
11.2 AMENAZA POR FLUJOS.....	139
12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	141
13. BIBLIOGRAFIA.....	145
ANEXO 1 .....	147

## FIGURAS

Figura 1. Flujo-diagrama general de la metodología a seguir. ....	5
Figura 2. Cartografía básica del municipio de Santa Bárbara, Antioquia. Tomado de IGAC, 2005. ....	16
Figura 3. Modelo de elevación digital del municipio de Santa Bárbara, Antioquia. ....	17
Figura 4. Modelo de sombras del municipio de Santa Bárbara, Antioquia. ....	18
Figura 5. Cubrimiento de ortofotos para el municipio de Santa Bárbara, Antioquia. ....	19
Figura 6. Imagen satelital RapidEye 2013-12-28t162851_re4_1b-nac_15318780_176576_orto. ....	20
Figura 7. Cobertura del municipio de Santa Bárbara en Google Earth. ....	21
Figura 8. Localización del municipio de Santa Bárbara, Departamento de Antioquia. Tomado de IGAC, 2005. ....	23
Figura 9. Mapa de la geología regional del municipio de Santa Bárbara, Antioquia. Tomado de las planchas 166 Jericó y 167 Sonsón (INGEOMINAS, 1980b y 1980c). ....	29
Figura 10. Mapa del Sistema de fallas regional del municipio de Santa Bárbara, Antioquia. Escala 1:100.000. Tomado de las planchas 166 Jericó y 167 Sonsón (INGEOMINAS, 1980b y 1980c). ....	31
Figura 11. Mapa de las unidades de relieve del municipio de Santa Bárbara, Antioquia. Tomado de CORANTIOQUIA, 2002. ....	32
Figura 13. Mapa de pendientes del municipio de Santa Bárbara, Antioquia. ....	38
Figura 14. Mapa de curvatura del municipio de Santa Bárbara, Antioquia. ....	40
Figura 15. Mapa de rugosidad del municipio de Santa Bárbara, Antioquia. ....	42
Figura 16. Mapa de relieve relativo del municipio de Santa Bárbara, Antioquia. ....	44
Figura 17. Geología local del municipio de Santa Bárbara, Antioquia. Modificado de las planchas 166 Jericó y 167 Sonsón (INGEOMINAS, 1980b y 1980c). ....	45
Figura 18. Metasedimentos foliados del Grupo Cajamarca, con bloques embebidos de areniscas, corregimiento de Damasco. ....	46
Figura 19. Muestra de mano de las cuarcitas biotítico-feldespáticas. Carretera Santa Bárbara –Montebello. ....	47

Figura 20. Neis Intrusivo Alto de Minas asociado al trazo de la Falla de San Jerónimo. Carretera Santa Bárbara –Montebello.....	48
Figura 21. Muestra de mano de pegmatita del Stock de la Honda. Carretera Santa Bárbara – Montebello.....	49
Figura 22. Cherts del miembro sedimentario, Formación Quebradagrande. Este afloramiento se encuentra ubicado en la quebrada El Chocho (vereda El Helechal). ....	50
Figura 23. Basaltos del miembro volcánico, Formación Quebradagrande. Este afloramiento se encuentra ubicado en la quebrada El Chocho (vereda El Helechal).....	51
Figura 24. Afloramiento de gabro macizo y de color gris verdoso, ubicado en la carretera Troncal. ....	52
Figura 25. Afloramiento de la Formación Amagá, donde se observan areniscas, areniscas conglomeráticas, arcillolitas y carbón, quebrada La Pita, corregimiento de Damasco.....	53
Figura 26. Bloques embebidos de una arenisca calcárea retrabajada en un estrato de arenisca gris verdosa, quebrada La Pita, corregimiento de Damasco. ....	54
Figura 27. Afloramiento de aglomerados de la Formación Combia ubicado en la quebrada La Pita, corregimiento de Damasco.....	55
Figura 28. Depósitos del río Poblano, vereda Poblano. ....	56
Figura 29. Mapa de las subunidades geomorfológicas del municipio de Santa Bárbara, Antioquia.....	58
Figura 30. Subunidad de cima alargada, regular, amplia y plana, corregimiento de Versalles . .....	59
Figura 31. Modelo de sombras donde se delimita la subunidad de cima alargada, regular y muy suave. ....	60
Figura 32. Modelo de sombras donde se delimita la subunidad de cima alargada, regular, angosta y muy suave.....	60
Figura 33. Modelo de sombras donde se delimita la subunidad de cima moderada, amplia y muy suave. ....	61
Figura 34. Modelo de sombras donde se delimita la subunidad de cima moderada a corta, amplia y suave.....	61
Figura 35. Modelo de sombras donde se delimita la subunidad de cima muy amplia, regular y plana. ....	61

Figura 36. Modelo de sombras donde se delimita la subunidad de cima redondeada, regular y muy suave. ....	62
Figura 37. Subunidad de ladera ondulada larga, irregular y suave ubicada cerca al Río Poblano. ....	62
Figura 38. Subunidad de ladera ondulada media, irregular y moderada.....	63
Figura 39. Subunidad y modelo de pendientes donde se observa el cerro estructural corto, cóncavo y de pendiente moderada y modelo de sombras con la delimitación de la subunidad cerro estructural corto, cóncavo y moderado. ....	64
Figura 40. Modelo de pendientes con la delimitación de la subunidad cerro estructural irregular y moderado. ....	64
Figura 41. Subunidad y modelo de pendientes del escarpe de línea de falla corto, regular y muy fuerte a escapardo. Damasco - Cerro Amarillo.....	65
Figura 42. Modelo de pendientes donde se delimita la subunidad espolón faceteado bajo de longitud corta.....	66
Figura 43. Espolón faceteado bajo de longitud media. ....	66
Figura 44. Subunidad y modelo de pendientes con la delimitación del espolón festoneado moderado de longitud corta. ....	67
Figura 45. Modelo de pendientes con la delimitación de la subunidad espolón festoneado moderado de longitud media. ....	67
Figura 46. Modelo de pendientes con la delimitación de la subunidad espolón festoneado moderado de longitud media. ....	68
Figura 47. Espolón moderado de longitud media. ....	69
Figura 48. Modelo de pendientes con la delimitación de la subunidad espolón moderado de longitud media. ....	69
Figura 49. Imagen tomada de Google Earth y modelo de sombras con la delimitación de la subunidad gancho de flexión corto, irregular y moderado a fuerte. ....	70
Figura 50. Ladera escalonada media, irregular y moderada. ....	71
Figura 51. Ladera escalonada larga irregular y moderada. ....	71
Figura 52. Modelo de sombras con la delimitación de la subunidad ladera estructural corta a media, convexa y moderada. ....	72
Figura 53. Modelo de sombras con la delimitación de la subunidad ladera estructural corta a media, irregular y moderada a fuerte. ....	72

Figura 54. Modelo de sombras con la delimitación de la subunidad ladera estructural corta, cóncava y fuerte.....	73
Figura 55. Modelo de sombras con la delimitación de la subunidad ladera estructural corta, cóncava y moderada a fuerte. ....	73
Figura 56. Modelo de sombras con la delimitación de la subunidad ladera estructural corta, cóncava y suave a moderada.....	74
Figura 57. Modelo de sombras con la delimitación de la subunidad ladera estructural corta, convexa y moderada a fuerte. ....	74
Figura 58. Subunidad y modelo de sombras con la delimitación de la subunidad ladera estructural corta, convexa y suave a moderada.....	75
Figura 59. Modelo de sombras con la delimitación de la subunidad ladera estructural corta, irregular y fuerte. ....	75
Figura 60. Subunidad y modelo de pendientes de ladera estructural corta, irregular y moderada a fuerte. ....	76
Figura 61. Modelo de pendientes donde se delimita la subunidad ladera estructural corta, regular y suave a moderada .....	76
Figura 62. Modelo de pendientes donde se delimita la subunidad ladera estructural larga, irregular y fuerte. ....	77
Figura 63. Subunidad y modelo de pendientes donde se delimita la subunidad ladera estructural media, irregular y moderada.....	77
Figura 64. Modelo de pendientes donde se delimita la subunidad ladera estructural media, irregular y moderada. ....	78
Figura 65. Modelo de pendientes donde se identifica la subunidad ladera estructural media, irregular y moderada a fuerte.....	78
Figura 66. Subunidad y modelo de pendientes de la ladera estructural media, regular y moderada.....	79
Figura 67. Subunidad ladera estructural media, regular y moderada.....	79
Figura 68. Modelo de pendientes donde se delimita la subunidad ladera estructural de longitud media, regular y moderada a fuerte. ....	80
Figura 69. Lomo de falla corto, convexo y suave a moderado. ....	80
Figura 70. Lomo de falla corto, convexo y suaves a moderado, donde se puede observar una cicatriz de deslizamiento inactivo. ....	81

Figura 71. Lomo de falla corto, convexo y moderado. ....	81
Figura 72. Mesa estructural corta, regular y moderada. ....	82
Figura 73. Ortofotografía donde se identifica la subunidad de barra lateral sobre el río Poblano. ....	83
Figura 74. Ortofotografía donde se identifica la subunidad de barra longitudinal dentro del Río Poblano. ....	84
Figura 75. Ortofotografía donde se identifica la subunidad de barra puntual sobre el río Poblano. ....	85
Figura 76. Cauce activo del río Poblano. ....	86
Figura 77. Mapa de pendientes con el que se delimita la subunidad de Terraza de acumulación alargada, amplia y muy suave del río Buey. ....	86
Figura 78. Mapa de pendientes con el que se delimita la subunidad de Terraza de acumulación alargada, regular y muy suave del río Poblano. ....	87
Figura 79. Mapa de coberturas terrestres del municipio de Santa Bárbara, Antioquia. ....	89
Figura 80. Mapa de la localización de los movimientos en masa. Santa Bárbara, Antioquia. ....	94
Figura 81. Ortofoto donde se identifica un deslizamiento traslacional, ubicado en la vereda La Arcadia, en cercanías a la Q. La Máquina. ....	95
Figura 82. Ortofoto donde se identifica un deslizamiento traslacional, ubicado en la vereda La Arcadia, al noroeste del municipio. ....	96
Figura 83. Ortofoto donde se identifica un deslizamiento traslacional, ubicado al oeste del casco urbano de Santa Bárbara. ....	96
Figura 84. Ortofoto donde se identifica un deslizamiento traslacional, ubicado en la vereda Poblano, a la derecha se observa la Q. La Loma. ....	97
Figura 85. Ortofoto donde se identifica un deslizamiento rotacional, situado al sur del municipio, cerca de la vereda El Buey. ....	98
Figura 86. Ortofoto donde se identifica un deslizamiento rotacional, ubicado al oeste del casco urbano de Versalles. ....	99
Figura 87. Ortofoto donde se identifica un deslizamiento rotacional, que se encuentra al noroeste del casco urbano de Versalles. ....	99
Figura 88. Ortofoto donde se identifica un flujo de tierra, localizado en la vereda Poblano, cerca de la Q. La Loma. ....	100



Figura 89. Ortofoto donde se identifica un flujo de tierras, como resultado de un deslizamiento, ubicado en el centro de la vereda Morroplano. ....	100
Figura 90. Gráfica de los valores de susceptibilidad para deslizamientos por el método heurístico. ....	102
Figura 91. Mapa de susceptibilidad por deslizamientos según el método heurístico, municipio de Santa Bárbara. ....	103
Figura 92. Gráfica de los valores de susceptibilidad para flujos por el método heurístico. ....	105
Figura 93. Mapa de susceptibilidad por flujos según el método heurístico, municipio de Santa Bárbara. ....	106
Figura 94. Gráfica de los valores de susceptibilidad para deslizamientos por el método estadístico univariado. ....	108
Figura 95. Mapa de susceptibilidad por deslizamientos según el método estadístico univariado, municipio de Santa Bárbara. ....	109
Figura 96. Gráfica de los valores de susceptibilidad para flujos por el método estadístico univariado. ....	111
Figura 97. Mapa de susceptibilidad por flujos según el método estadístico univariado, municipio de Santa Bárbara. ....	112
Figura 98. Gráfica de los valores de susceptibilidad para deslizamientos por el método estadístico bivariado. ....	114
Figura 99. Mapa de susceptibilidad por deslizamientos según el método estadístico bivariado, municipio de Santa Bárbara. ....	115
Figura 100. Gráfica de los valores de susceptibilidad para flujos por el método estadístico bivariado. ....	117
Figura 101. Mapa de susceptibilidad por flujos según el método estadístico bivariado, municipio de Santa Bárbara. ....	118
Figura 102. Mapas de precipitación máxima en 24 horas para diferentes periodos de retorno, municipio de Santa Bárbara. ....	121
Figura 103. Mapa del detonante sismo para el municipio de Santa Bárbara. ....	123
Figura 104. Gráficas de la relación del porcentaje de deslizamientos con respecto al área acumulada, para un $T_r=25$ años con los diferentes métodos ....	125
Figura 105. Gráficas de la relación del porcentaje de flujos con respecto al área acumulada, para un $T_r=25$ años con los diferentes métodos ....	126

Figura 106. Gráficas de la relación del porcentaje de deslizamientos con respecto al área acumulada, para un $T_r=50$ años con los diferentes métodos .....	128
Figura 107. Gráficas de la relación del porcentaje de flujos con respecto al área acumulada, para un $T_r=50$ años con los diferentes métodos .....	129
Figura 108. Gráficas de la relación del porcentaje de deslizamientos con respecto al área acumulada, para un $T_r=100$ años con los diferentes métodos .....	131
Figura 109. Gráficas de la relación del porcentaje de flujos con respecto al área acumulada, para un $T_r=100$ años con los diferentes métodos .....	133
Figura 111. Mapas de amenaza por deslizamientos según el método estadístico bivariado, municipio de Santa Bárbara.....	137
Figura 112. Mapas de amenaza por flujos según el método estadístico bivariado, municipio de Santa Bárbara.....	139

## TABLAS

Tabla 1. Tipos de movimientos en masa. (Modificado de PMA: GCA, 2007).....	8
Tabla 2. Descripción del atributo Pendiente. ....	37
Tabla 3. Descripción del atributo Curvatura. ....	39
Tabla 4. Descripción del atributo Rugosidad.....	41
Tabla 5. Descripción del atributo Relieve relativo. ....	43
Tabla 6. Descripción de las coberturas terrestres del municipio de Santa Bárbara. ....	87
Tabla 7. Descripción de los procesos morfodinámicos. ....	93
Tabla 8. Descripción susceptibilidad a deslizamientos por el método heurístico. ....	102
Tabla 9. Descripción susceptibilidad a flujos por el método heurístico.....	105
Tabla 10. Descripción susceptibilidad a deslizamientos por el método estadístico univariado. .....	109
Tabla 11. Descripción susceptibilidad a flujos por el método estadístico univariado. ....	111
Tabla 12. Descripción susceptibilidad a deslizamientos por el método estadístico bivariado.. .....	114
Tabla 13. Descripción susceptibilidad a flujos por el método estadístico bivariado. ....	117
Tabla 14. Calificación de los valores de PGA de menor a mayor grado de contribución de la amenaza sísmica a su contribución a los movimientos en masa (Tomado de SGC, 2013). ....	122
Tabla 16 Consolidado de las áreas involucradas para las diferentes categorías de amenaza por flujos, según cada período de retorno y método de zonificación. ....	134
Tabla 17. Amenaza por deslizamientos, según el método estadístico bivariado.....	137
Tabla 18. Amenaza por flujos, según el método estadístico bivariado. ....	139

## INTRODUCCION

Los fenómenos de origen natural, ya sean movimientos en masa, inundaciones, terremotos, etc., constituyen una de las causas más frecuentes de pérdidas humanas, además de dejar un costo muy importante a nivel económico y social. En este sentido, es muy importante conocer la amenaza natural, analizarla y entenderla como un tema prioritario para el desarrollo de las sociedades.

Actualmente, la evaluación de la amenaza por este tipo de eventos es uno de los temas de mayor interés no solo a nivel científico, sino también social, económico, entre otros; por consiguiente, el presente trabajo pretende aportar al conocimiento de elementos metodológicos por medio de una comparación en un sentido cualitativo y cuantitativo, de la zonificación de la amenaza por movimientos en masa en el suelo rural del municipio de Santa Bárbara, para conocer como es más factible generar resultados en este tipo de estudios, que coincidan de una manera más exacta con la realidad de la zona de estudio.

Para este trabajo se cuenta con la siguiente secuencia de procesos: primero se presentan los objetivos y la metodología del proyecto; el marco teórico donde se describe que es la amenaza, los diferentes tipos movimientos en masa y los métodos de zonificación utilizados (métodos heurístico, estadístico univariado y estadístico bivariado); se exponen las generalidades del área de estudio, como la localización, estudios anteriores y la descripción del marco geológico y geomorfológico regional; las variables condicionantes a emplear en la zonificación de amenazas por movimientos en masa, como la geología y geomorfología local, la morfometría (pendientes, curvatura, relieve relativo, rugosidad) y las coberturas vegetales; se describen los procesos gravitacionales identificados por medio de los sensores remotos y el trabajo de campo; seguido de esto se explica la susceptibilidad por movimientos en masa, diferenciada para deslizamientos y flujos de la zona de estudio por el método heurístico, estadístico univariado y estadístico bivariado; de igual manera se presentan los detonantes, lluvia y sismo. Por último se muestran los resultados de la zonificación de la amenaza por cada uno de los métodos y se generan las conclusiones y recomendaciones.

Como parte de la comparación de los resultados contenidos en este proyecto, se destaca que, dado a la importancia que tiene esta información, en el desarrollo de las sociedades, se debe procurar utilizar métodos cuantitativos, donde la determinación de la amenaza no dependa del criterio subjetivo de uno o varios expertos, ya que al finalizar el análisis con los resultados arrojados por los tres métodos, se concluyó que el método estadístico bivariado es el que mejor representa la realidad de la zona de estudio.

## **HIPÓTESIS**

Si el método heurístico es el más usado para realizar la zonificación de amenaza por movimientos en masa, se esperaría que en el proceso de la comparación, los resultados de este método tengan más semejanza con la realidad de la zona de estudio.

## **PREGUNTA DE TRABAJO**

¿Cuál de los tres métodos (heurístico, estadístico univariado y estadístico bivariado) utilizados para realizar la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25000 en el municipio de Santa Bárbara, Antioquia es el que se aproxima más a la realidad?

## **PROBLEMA DE TRABAJO**

La gran mayoría de los trabajos de zonificación de amenaza por movimientos en masa son realizados con el método heurístico, por lo tanto el problema es que no se ha comprobado si realmente es éste método el que más se aproxima a la realidad por medio de comparaciones con otros métodos, como son en este caso los métodos estadístico univariado y el estadístico bivariado.

# **1. OBJETIVOS**

## **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Comparar los resultados obtenidos entre los métodos Heurístico, Estadístico Univariado y Estadístico Bivariado para la zonificación de amenazas por movimientos en masa a escala 1:25.000 en el municipio de Santa Bárbara, Antioquia.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Recopilar la información bibliográfica secundaria para el desarrollo de cada método, además de lo correspondiente a las generalidades y las condiciones del suelo en el área de estudio.
- Realizar un análisis geomorfológico y geológico a escala 1:25.000, para determinar las zonas mas propensas a movimientos en masa por medio del uso de sensores remotos y la herramienta SIG.
- Generar las variables morfométricas del área de estudio, a partir de la cartografía base y los mapas preliminares al trabajo de campo.
- Recolectar la información primaria a escala 1:25.000, por medio del trabajo de campo para la ejecución de cada método.
- Aplicar el método heurístico, estadístico univariado y estadístico bivariado por medio de la herramienta SIG y generar los mapas correspondientes.
- Analizar, interpretar y comparar los resultados obtenidos por cada uno de los métodos.
- Compilar los resultados obtenidos para entregar conclusiones y recomendaciones.

## **2. METODOLOGIA**

Para realizar este proyecto se proponen una serie de actividades que permiten llegar a los resultados planteados en el objetivo general:

1. Este proceso implica adelantar una recopilación de la información secundaria de cada método (Método Heurístico, Estadístico Univariado y Estadístico Bivariado); así como una revisión de la información propia del área de estudio.
2. Elaboración de los mapas temáticos preliminares de geología, geomorfología y movimientos en masa, por medio de la información secundaria y el análisis geológico y geomorfológico, utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) y sensores remotos.
3. Visitas a campo que permitan verificar y complementar los datos preexistentes, además de ajustar los mapas preliminares. De igual manera realizar en cada zona un análisis de susceptibilidad a movimientos en masa.
4. Preparar y estructurar la información temática (cobertura vegetal, geología y geomorfología), además a partir del DEM y la cartografía base, generar las variables morfométricas en formato raster (pendientes, rugosidad, relieve relativo y curvatura), para desarrollar los modelos.
5. Realizar el trabajo de oficina en el cual se integran los datos obtenidos anteriormente y se aplica la metodología de análisis para realizar los mapas definitivos utilizando cada método (Método Heurístico, Estadístico Univariado y Estadístico Bivariado) por medio de la herramienta SIG.
6. Posteriormente se escriben los resultados y análisis en el informe final, seguido de la sustentación oral del proyecto (Figura 1).



Figura 1. Flujo-diagrama general de la metodología a seguir.



### **3. CONCEPTUALIZACION**

En este capítulo se presenta el marco conceptual que guía el desarrollo de este proyecto. De esta manera, se encuentran diferentes términos, conceptos e ideas a utilizar en el análisis del problema de investigación.

#### **3.1 SUSCEPTIBILIDAD**

La susceptibilidad se entiende como la predisposición de un lugar a presentar determinados fenómenos amenazantes, estas condiciones del terreno son intrínsecas, como por ejemplo la geología, la pendiente, la precipitación, entre otras. Aunque se espera que los movimientos en masa ocurran con más frecuencia en la mayoría de las zonas susceptibles, en los análisis de susceptibilidad, no se tiene en cuenta el tiempo de recurrencia (SGC, 2013).

#### **3.2 AMENAZA**

A pesar de la gran cantidad de autores que han definido este concepto, existe cierta uniformidad en las definiciones, entendiéndose la amenaza como un peligro latente asociado con la posible ocurrencia de uno o varios fenómenos o eventos de origen natural, social o tecnológico, o provocados por el hombre, que pueden presentarse en un sitio específico y por un tiempo determinado, produciendo efectos adversos en las personas, bienes y/o el ecosistema. De esta manera, la amenaza se caracteriza por estar asociada a una probabilidad de ocurrencia, tener un sitio de afectación y una intensidad particular (Londoño, 2006).

Aunque existen diversas formas de clasificar las amenazas, uno de esos tipos de clasificación se puede dar según las causas del evento (Londoño, 2006):

- Amenazas naturales: obedecen a la dinámica del planeta tierra expresada en procesos hidrogeológicos, atmosféricos y biológicos.

- Amenazas socionaturales: generadas por la intervención del ser humano sobre la naturaleza, que induce a la ocurrencia de ciertos procesos generalmente considerados naturales. Eventos como deslizamientos, inundaciones, desertificación o hundimientos son expresiones de este tipo de amenazas.

-Amenazas antrópico-contaminantes y antrópico-tecnológicas: Referidas a procesos de contaminación ocasionados por derrames, emisiones o dispersiones de sustancias tóxicas hacia el aire, suelo y agua o por posibles fallas en procesos industriales e infraestructurales en espacios urbanos o que se realizan en cercanía a ellos. Para incorporar el concepto de amenaza a un fenómeno o proceso de origen natural o antrópico, deben existir algunos elementos amenazados (población, economía, infraestructura, ecosistemas).

La amenaza según el Congreso de la Republica en la Ley 1523 de 2012 (abril 24) es definida como un peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales; en dicha ley se adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. La gestión del riesgo, es un proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo y para el manejo de desastres, con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible.

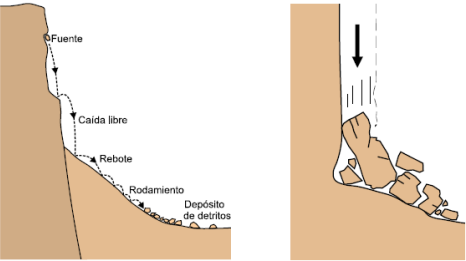
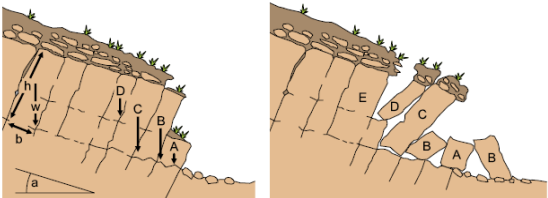
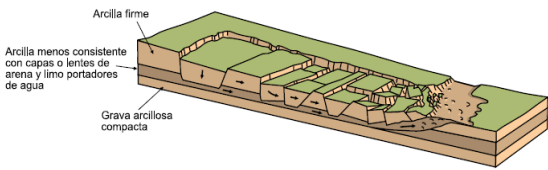
### **3.3 MOVIMIENTOS EN MASA**

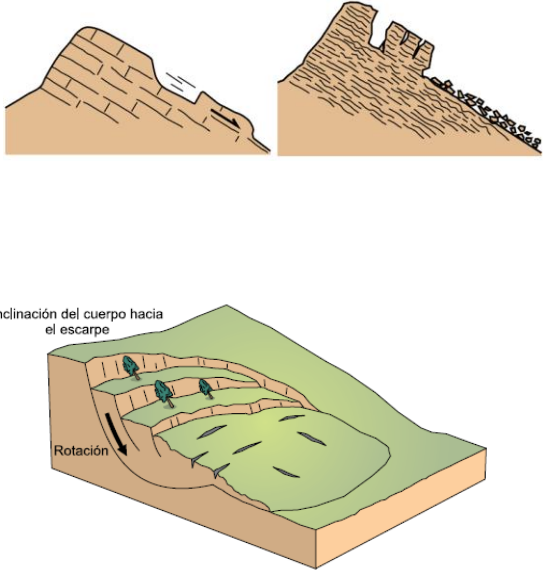
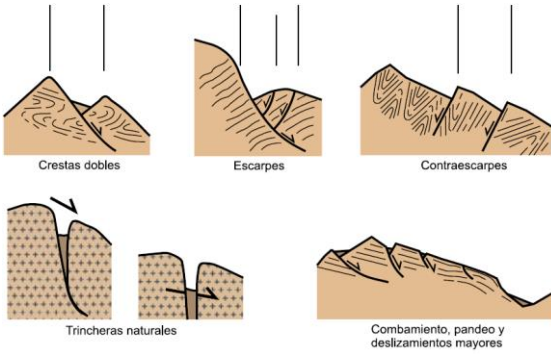
El término movimientos en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo o de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad. En la literatura científica se encuentran muchas clasificaciones de movimientos en masa; la mayoría de ellas se basan en el tipo de materiales, los mecanismos de movimiento, el grado de deformación del material y el grado de saturación (PMA: GCA, 2007).

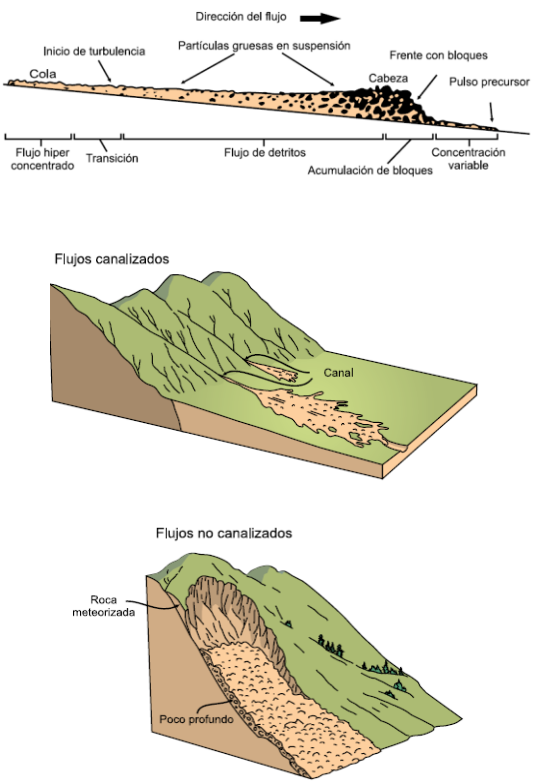
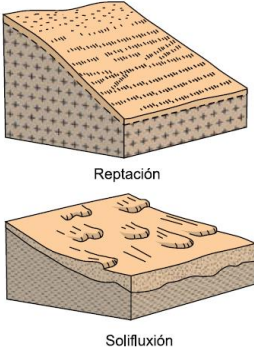
#### **3.3.1 TIPOS DE MOVIMIENTOS**

Las clasificaciones de movimientos en masa de Varnes (1958, 1978) y Hutchinson (1968,1988) son, hoy en día, los sistemas más ampliamente aceptados en el mundo de habla inglesa e hispana. Se emplea como criterio principal en la clasificación, el tipo de movimiento y en segundo lugar, el tipo de material. Así, divide los movimientos en masa en distintos tipos: caídas, volcamientos, deslizamientos, propagaciones, flujos, reptación y deformaciones gravitacionales profundas (Ver tabla 1). Además, divide los materiales en dos clases: rocas y suelos, éstos últimos subdivididos en detritos y tierra (PMA: GCA, 2007).

Tabla 1. Tipos de movimientos en masa. (Tomado de PMA: GCA, 2007).

TIPOS DE MOVIMIENTO		
CAÍDAS		<p>-Uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera, cae desplazándose principalmente por el aire pudiendo efectuar golpes, rebotes y rodamiento.</p> <p>-El movimiento es muy rápido a extremadamente rápido.</p>
VOLCAMIENTOS		<p>-Rotación generalmente hacia adelante de uno o varios bloques de roca o suelo, alrededor de un punto o pivote de giro en su parte inferior.</p> <p>-Pueden ser lentos y graduales.</p>
PROPAGACIÓN LATERAL		<p>-El desplazamiento ocurre predominantemente por deformación interna (expansión) del material. El estrato competente superior puede fracturarse y separarse en bloques o losas; el material blando inferior fluye hacia las grietas entre los bloques.</p> <p>-El movimiento de éstos es extremadamente lento.</p>

<p><b>DESPLAZAMIENTOS</b></p>	 <p>The top part shows two cross-sections of translational landslides. The left one shows a block moving along a flat failure surface. The right one shows a block moving along a wavy failure surface. The bottom part shows a 3D block rotating along a curved failure surface. Labels include 'Inclinación del cuerpo hacia el escarpe' (inclination of the body towards the scarp) and 'Rotación' (rotation).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Traslacional</i>: la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla plana u ondulada como fallas, diaclasas, planos de estratificación o planos de contacto entre la roca y el suelo residual.</li> <li>-La velocidad puede variar desde rápida a extremadamente rápida.</li> <li>- <i>Rotacional</i>: la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla curva y cóncava.</li> <li>-Pueden ocurrir lenta a rápidamente</li> </ul>
<p><b>DEFORMACIONES GRAVITACIONALES PROFUNDAS</b></p>	 <p>The top row shows three cross-sections: 'Crestas dobles' (double crests), 'Escarpes' (escarpes), and 'Contraescarpes' (contraescarpes). The bottom row shows 'Trincheras naturales' (natural trenches) and 'Combamiento, pandeo y deslizamientos mayores' (buckling, bending, and major landslides).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Presentan rasgos de deformación, pero sin el desarrollo de una superficie de ruptura definida.</li> <li>-Usualmente con muy baja magnitud de velocidad y desplazamiento.</li> </ul>

<p style="text-align: center;"><b>FLUJOS</b></p>	 <p>El diagrama superior muestra un perfil longitudinal de un flujo de detritos con una flecha indicando la 'Dirección del flujo'. Se identifican varias zonas: 'Cola' (atrás), 'Inicio de turbulencia', 'Flujo hiper concentrado', 'Transición', 'Partículas gruesas en suspensión', 'Flujo de detritos', 'Acumulación de bloques', 'Frente con bloques', 'Cabeza' (adelante) y 'Pulso precursor'. Se menciona también una 'Concentración variable'. El diagrama inferior izquierdo, 'Flujos canalizados', muestra un cauce con un 'Canal' definido. El diagrama inferior derecho, 'Flujos no canalizados', muestra un flujo descendiendo por una ladera con 'Roca meteorizada' y un 'Poco profundo'.</p>	<p><i>-Flujo de lodo:</i> flujo canalizado muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados plásticos</p> <p><i>-Flujo de tierra:</i> es un movimiento intermitente, rápido o lento, de suelo arcilloso plástico. Los flujos de tierra desarrollan velocidades moderadas.</p> <p><i>-Flujo de detritos:</i> es un flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados, no plásticos, que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce con pendiente pronunciada.</p>
<p style="text-align: center;"><b>REPTACIÓN</b></p>	 <p>El diagrama superior, 'Reptación', muestra un bloque de terreno con una superficie irregular y una línea de fractura interna. El diagrama inferior, 'Solifluxión', muestra un perfil de terreno con una superficie ondulada y una línea de fractura interna.</p>	<p>-Se refiere a aquellos movimientos lentos del terreno en donde no se distingue una superficie de falla.</p> <p>-Dentro de este movimiento se incluyen la solifluxión y la gelifluxión, este último término reservado para ambientes periglaciales.</p>

### 3.4 METODOS DE ZONIFICACIÓN

Para los mapas de zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa existe una clara relación entre los siguientes tres factores: a) El propósito de la zonificación (información, planificación, pre-diseño, diseño), b) El nivel de zonificación (Básico, Intermedio y Avanzado) y c) La escala de zonificación (SGC, 2013).

### 3.4.1 MÉTODO HEURÍSTICO

Conocido como “método geomorfológico subjetivo” (PMA: GCA, 2007). Éste método se fundamenta en categorizar y ponderar los factores causantes de inestabilidad según la influencia esperada de éstos en la generación de movimientos en masa. Es un método conocido como indirecto, los resultados se pueden extrapolar a zonas sin movimientos en masa con una combinación de factores similar (SGC, 2013).

Para los modelos heurísticos, se utilizan las opiniones de expertos para estimar el potencial de deslizamientos a partir de datos de las variables independientes del lugar. El diseño de este tipo de modelos requieren un análisis exhaustivo de los factores causales y su relación en el área de estudio (Castellanos et al, 2008). Los resultados del modelo dependen fuertemente de la experiencia y los conocimientos de los investigadores, incluso más que en las evidencias de campo y los datos; sin embargo es el único enfoque posible para deslizamientos causados por diferentes mecanismos (Ruff et al, 2008). Las áreas de amenaza se clasifican por términos tales como "muy alta", "alta", "moderada", "baja" y "muy baja" (Castellanos et al, 2008). Aunque la cartografía geomorfológica detallada es esencial, ésta técnica permite la valoración cualitativa a la susceptibilidad a deslizamientos para grandes áreas en un tiempo relativamente corto (M. Van Den Eeckhaut et al, 2010).

La escala de susceptibilidad siempre es subjetiva y se debe indicar en una leyenda especial en el mapa de terreno. En este método es clave la experiencia del geomorfólogo (PMA: GCA, 2007), debido a este grado de subjetividad no se pueden comparar documentos producidos por diferentes autores.

Dentro de este método se ha utilizado el denominado AHP (Proceso de Análisis Jerárquico) que consiste en un método semicualitativo que involucra una comparación por pares realizada por los expertos a partir de una matriz de atributos o variables que contribuyen a los movimientos en masa. Se pueden realizar dos tipos de análisis heurísticos mediante el análisis geomorfológico y mapa de combinación cualitativo. Estos métodos permiten la regionalización o estudio a escala regional y son adecuados para aplicaciones en el campo de los sistemas expertos (SGC, 2013).

#### 3.4.1.1 Análisis Geomorfológico.

Es un método para producir un mapa combinado de amenaza basado en el mapeo de testigos mudos; este método se conoce como método directo puesto que la amenaza se determina directamente en el campo por los expertos. Se basa en la experiencia individual y el uso de razonamiento por analogía (*reasonings analogy*) atributos semejantes en cosas diferentes. Las reglas de decisión son entonces difíciles de formular a causa de que varía de lugar a lugar (SGC, 2013).

### 3.4.1.2 Mapa de Combinación Cuantitativa.

Para evitar el problema de reglas ocultas propias del mapeo geomorfológico se usan métodos basados en la combinación de mapas cualitativos. En estos mapas los científicos de la tierra usan su experiencia para asignar pesos en una serie de mapas de parámetros. Las condiciones del terreno de un gran número de sitios se suman de acuerdo con estos pesos para obtener valores de amenaza que se puedan agrupar en clases. Sobre la base de su conocimiento en las causas de la inestabilidad se asignan pesos para diferentes clases o número de mapas de parámetros. El problema con este método es la determinación exacta de los pesos de manera que puedan ser replicables. A menudo si no hay datos suficientes de campo se pueden llegar a hacer generalizaciones inaceptables (SGC, 2013).

### 3.4.2 METODO ESTADÍSTICO UNIVARIADO

El modelamiento cuantitativo estadístico univariado, utiliza como variable independiente el mapa de densidad de procesos morfodinámicos, el cual se aplica donde se tiene un buen registro de movimientos en masa actuales y pasados. En este método se determina el peso o fragilidad que cada unidad de terreno tiene hacia la generación de movimientos en masa. Las unidades de terreno consideradas para el modelamiento en el SIG son básicamente: geología, geomorfología, coberturas terrestres, pendientes, rugosidad, relieve relativo y curvatura (INGEOMINAS – CVC, 2001).

Este método de zonificación de susceptibilidad se basa principalmente en identificar y determinar cuantitativamente el grado de influencia que cada variable o factor intrínseco, tiene en la generación de los movimientos en masa cartografiados. El peso o grado de influencia que cada factor interno del terreno tiene sobre la generación de los movimientos en masa, se determina calculando la sumatoria de las áreas de cada tipo de movimiento en masa que se encuentren dentro de las áreas que abarca cada unidad cartográfica de parámetro, así:

$$W = DZX/S$$

Dónde:  $W$  = Peso o susceptibilidad de la unidad respecto al movimiento en masa analizado.

$DZX$  = Superficie acumulada de movimiento en masa de tipo  $X$  ( $m^2$ ) que hay sobre la unidad.

$S$  = Superficie total de la unidad ( $m^2$ ).

Los rangos de susceptibilidad se definen con base en un análisis estadístico de dispersión mediante el ajuste de los datos a una curva de distribución normal para todos los mapas

índice, según el tipo de proceso. El máximo de las curvas indica la categoría media, a partir de la cual se seleccionan los rangos desde nula a muy alta. Estos rangos pueden ajustarse según el criterio del profesional a cargo cuando se haga la validación de lo obtenido en el procesamiento comparado con la realidad vista en el campo (INGEOMINAS – CVC, 2001).

### 3.4.3 METODO ESTADÍSTICO BIVARIADO

En los análisis estadísticos de amenaza por movimientos en masa se combinan factores que han generado los movimientos en masa en el pasado y que se pueden determinar de forma estadística. De esta manera se hacen predicciones cuantitativas para áreas libres de movimientos en masa donde existen condiciones similares (SGC, 2013).

En el análisis estadístico bivariado cada factor condicionante (como la geología, la geomorfología, la pendiente, la rugosidad, el relieve relativo y la cobertura terrestre), se combina con la frecuencia de los movimientos en masa y se calculan valores ponderados de densidades de movimientos en masa para cada clase, por lo tanto, en menor área acumulada de susceptibilidad se encuentra un mayor porcentaje de movimientos en masa (Chalkias et al., 2014).

Para este método, específicamente denominado método de proporción de la frecuencia (frequency ratio method), método del índice estadístico (The statistical index method) o de información ponderada, la evaluación de la susceptibilidad involucra tres pasos: (a) el inventario de movimientos en masa. (b) El mapeo de los parámetros más significativos (factores condicionantes) en la distribución espacial de los movimientos y su análisis (c) la definición de los pesos relativos a cada factor asociado a la localización de movimientos en masa (CORANTIOQUIA-EAFIT, 2015a).

Este método asigna un valor de peso determinado  $W_i$  a cada clase de parámetro, por ejemplo una unidad geológica o una unidad geomorfológica. Van Westen (1997) define el valor  $W_i$  como el logaritmo natural de la densidad de deslizamientos dentro de la clase, dividido por la densidad de deslizamientos en general en todo el mapa. A continuación se presenta la expresión utilizada para la calificación de las unidades al interior de los diferentes factores (CORANTIOQUIA-EAFIT, 2015a).

$$W_i = \ln\left(\frac{Densclas}{Densmap}\right) = \ln\left[\frac{\frac{Npix(Si)}{Npix(Ni)}}{\frac{\sum Npix(Si)}{\sum Npix(Ni)}}\right]$$



$W_i$	=	Ponderación dado a determinado parámetro de clase (ejemplo, tipo de roca).
$Densclas$	=	Densidad de los deslizamientos dentro del parámetro de clase.
$Densmap$	=	Densidad de los deslizamientos dentro del todo el mapa.
$Npix (S_i)$	=	Número de pixeles que contienen deslizamientos dentro de un determinado parámetro de clase.
$Npix (N_i)$	=	Número total de pixeles e un determinado parámetro de clase.

## **4. INSUMOS BÁSICOS**

La zonificación de amenaza por movimientos en masa está sujeta al uso de información básica e insumos generales, estos elementos permiten delimitar correctamente el área de estudio, los objetivos generales y específicos, y los alcances del presente trabajo. A continuación se hace una descripción general de cada uno de estos insumos empleados y sus características asociadas.

### **4.1 BASE CARTOGRÁFICA**

Se empleó la base cartográfica temática de la zona, correspondiente a las planchas 166 Jericó y 167 Sonsón escala 1:100.000, facilitada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC (2005). La información contenida en esta base cartográfica comprende curvas de nivel cada 50 m, redes de drenaje, cuerpos de agua, orografía, límites administrativos y construcciones, entre otros. En la Figura 2 se presenta la cartografía básica para el municipio de Santa Bárbara.

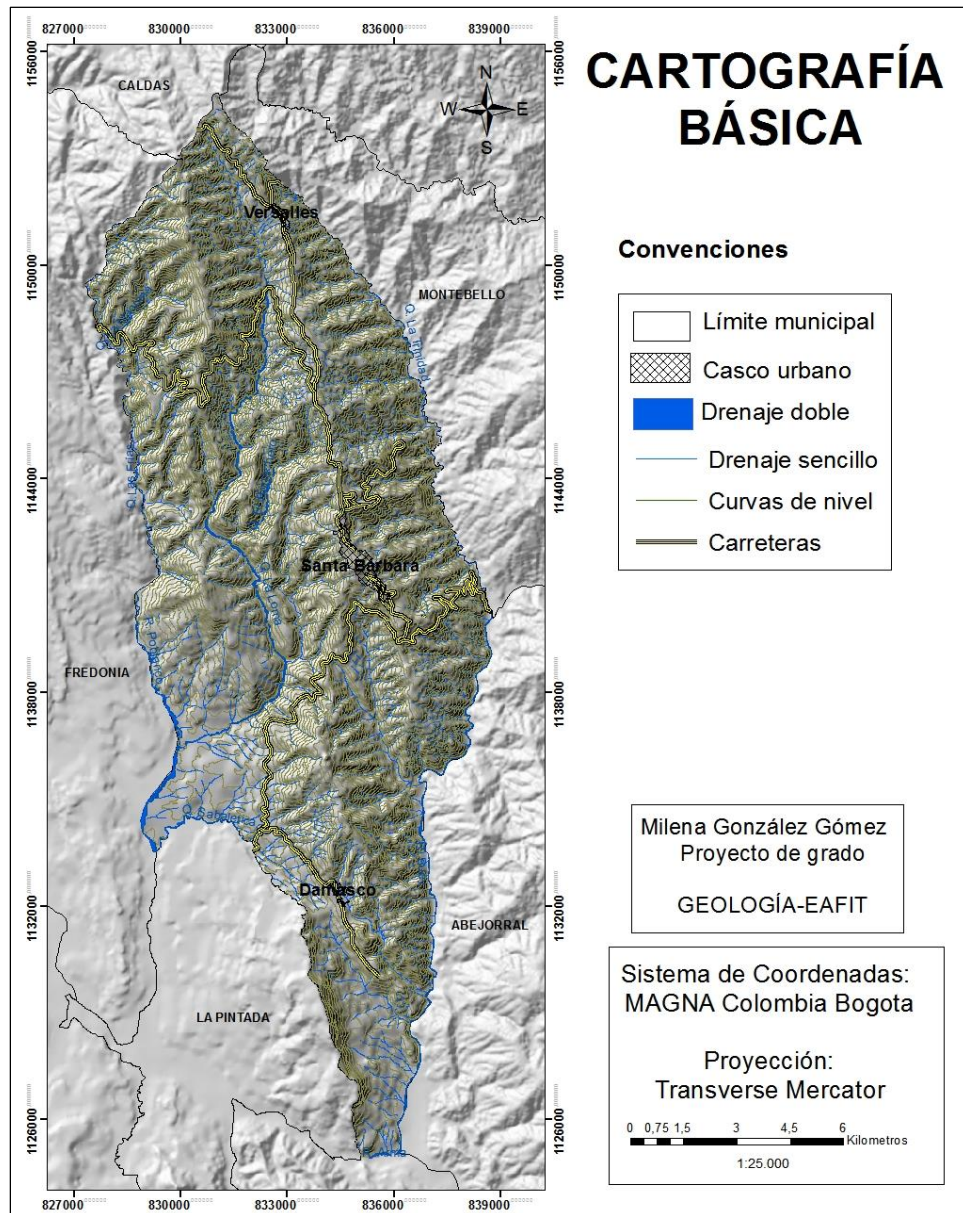


Figura 2. Cartografía básica del municipio de Santa Bárbara, Antioquia. Tomado de IGAC, 2005.

## 4.2 DEM - MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN

La topografía de un área representa una característica muy importante al momento de analizar la susceptibilidad o propensión del terreno a sufrir deslizamientos. A partir de un modelo de elevaciones del terreno es posible calcular otras variables determinantes, como pueden ser la pendiente, la curvatura del terreno, las dimensiones de cuencas que drenen hacia un mismo punto, las orientaciones de ladera, y hasta la forma como el sol ilumina la superficie (Londoño, 2006).

Para el municipio de Santa Bárbara, en el presente estudio, se ha generado un modelo de elevaciones a partir de curvas de nivel (cada 50 m). Este modelo consiste en una malla continua de celdas o píxeles (Raster) a la cual se le da el nombre de Modelo Digital de Elevación DEM. Dicha malla de puntos podría tener el tamaño de píxel o celda deseado, en este caso se usó el tamaño de píxel de 25 m x 25 m, debido a la escala del trabajo (Figura 3).

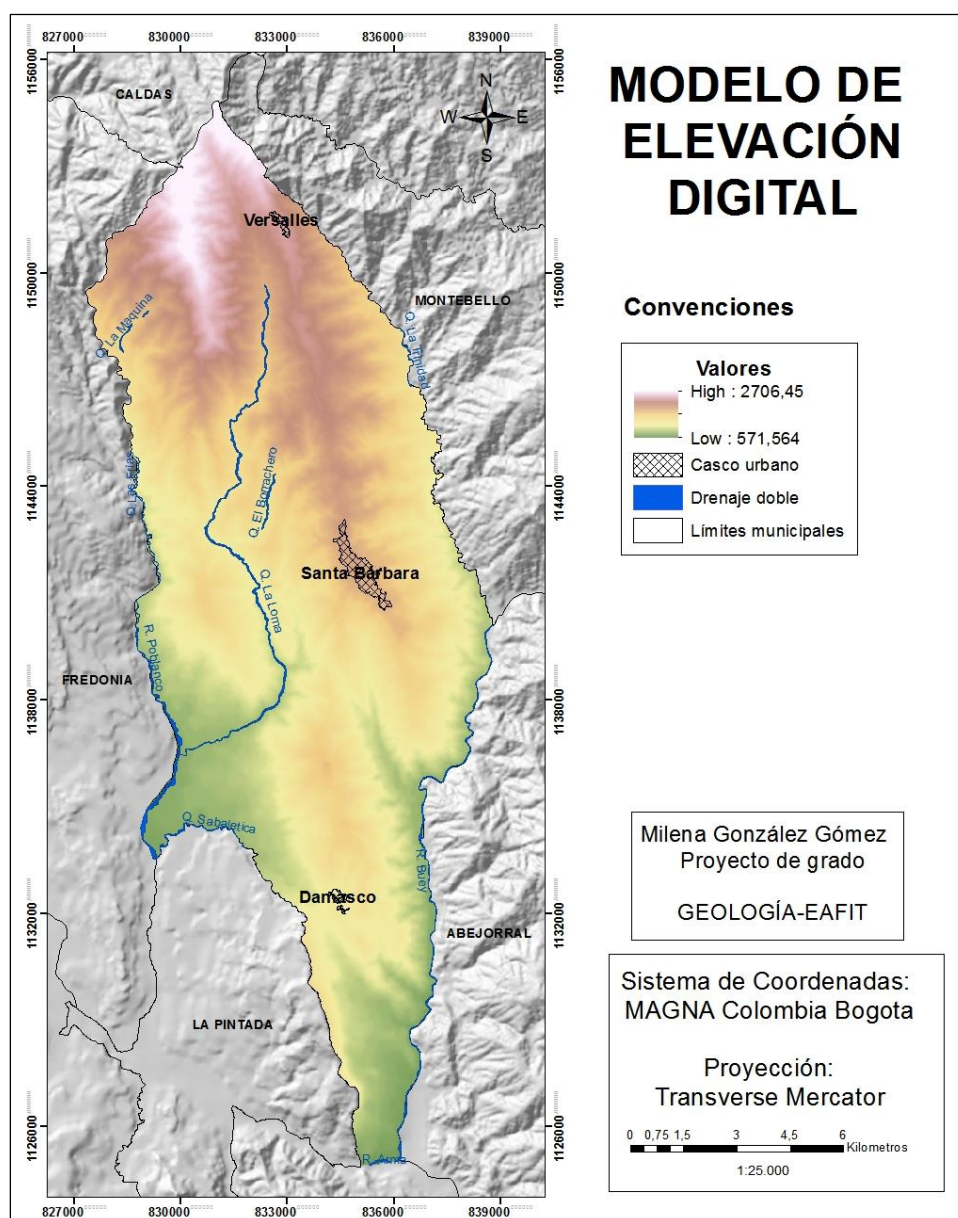


Figura 3. Modelo de elevación digital del municipio de Santa Bárbara, Antioquia.

### 4.3. MODELO DE SOMBRAS

El modelo de sombras, elaborado a partir del DEM, en conjunto con la base cartográfica fue utilizado para definir las unidades geomorfológicas y los procesos morfodinámicos presentes en el área superficial de la zona de estudio (Figura 4).

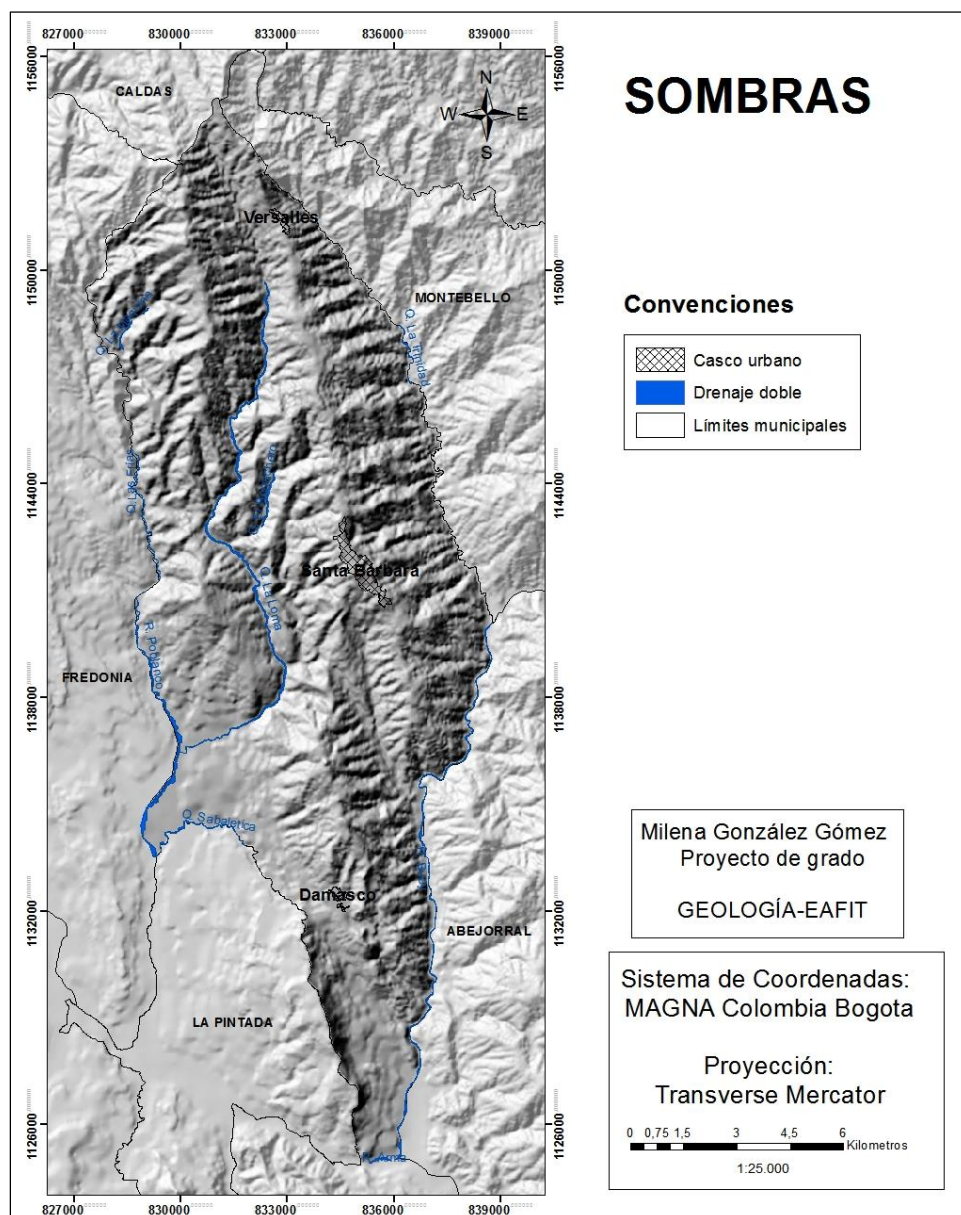


Figura 4. Modelo de sombras del municipio de Santa Bárbara, Antioquia.



### 4.3. SENSORES REMOTOS

Se utilizaron diferentes sensores remotos, los cuales sirvieron para la delimitación de unidades geomorfológicas y de procesos morfodinámicos. Entre los sensores remotos se contó con la disponibilidad de ortofotos (Figura 5) las cuales cubrían la mayor parte del área de estudio; para las zonas que no contaban con cobertura de ortofotos, se utilizaron imágenes de satélite RapidEye (Figura 6) y la herramienta Google Earth (Figura 7).

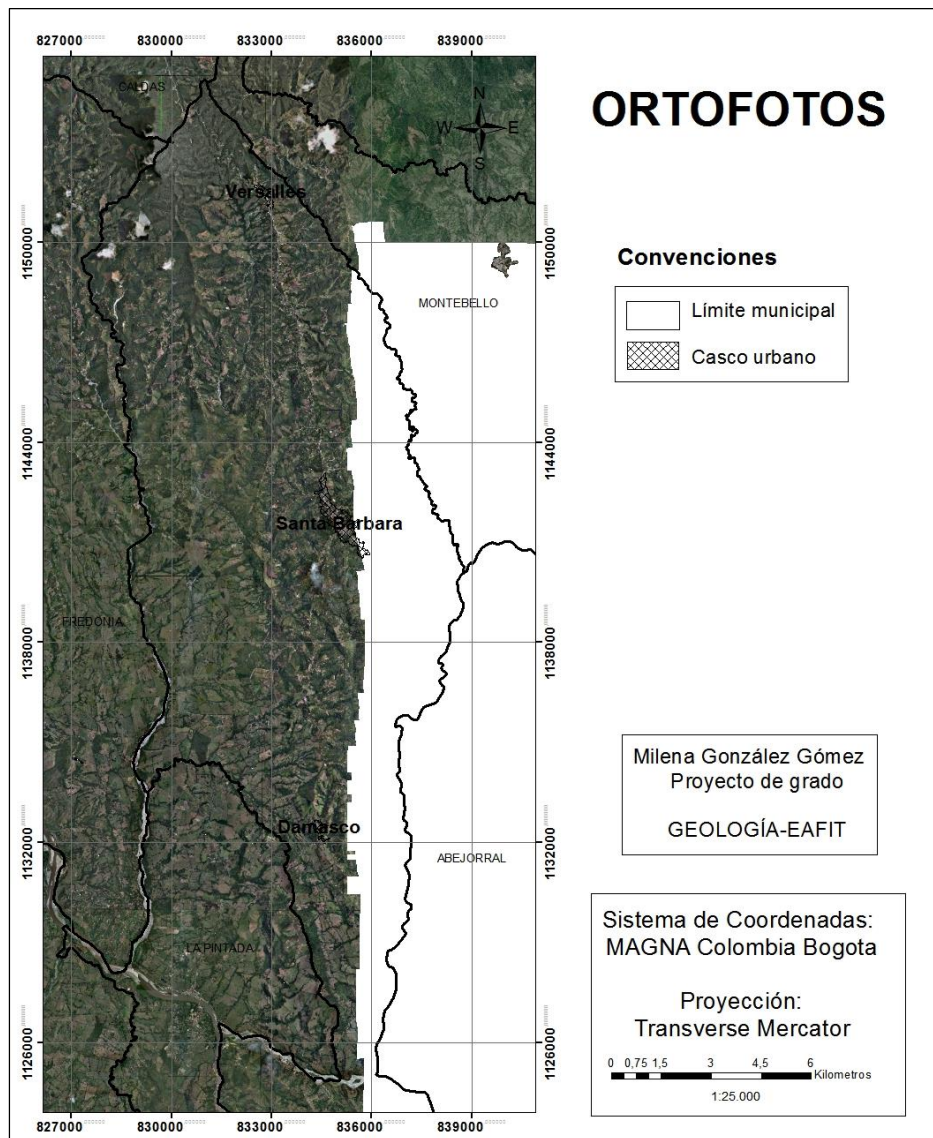


Figura 5. Cubrimiento de ortofotos para el municipio de Santa Bárbara, Antioquia.

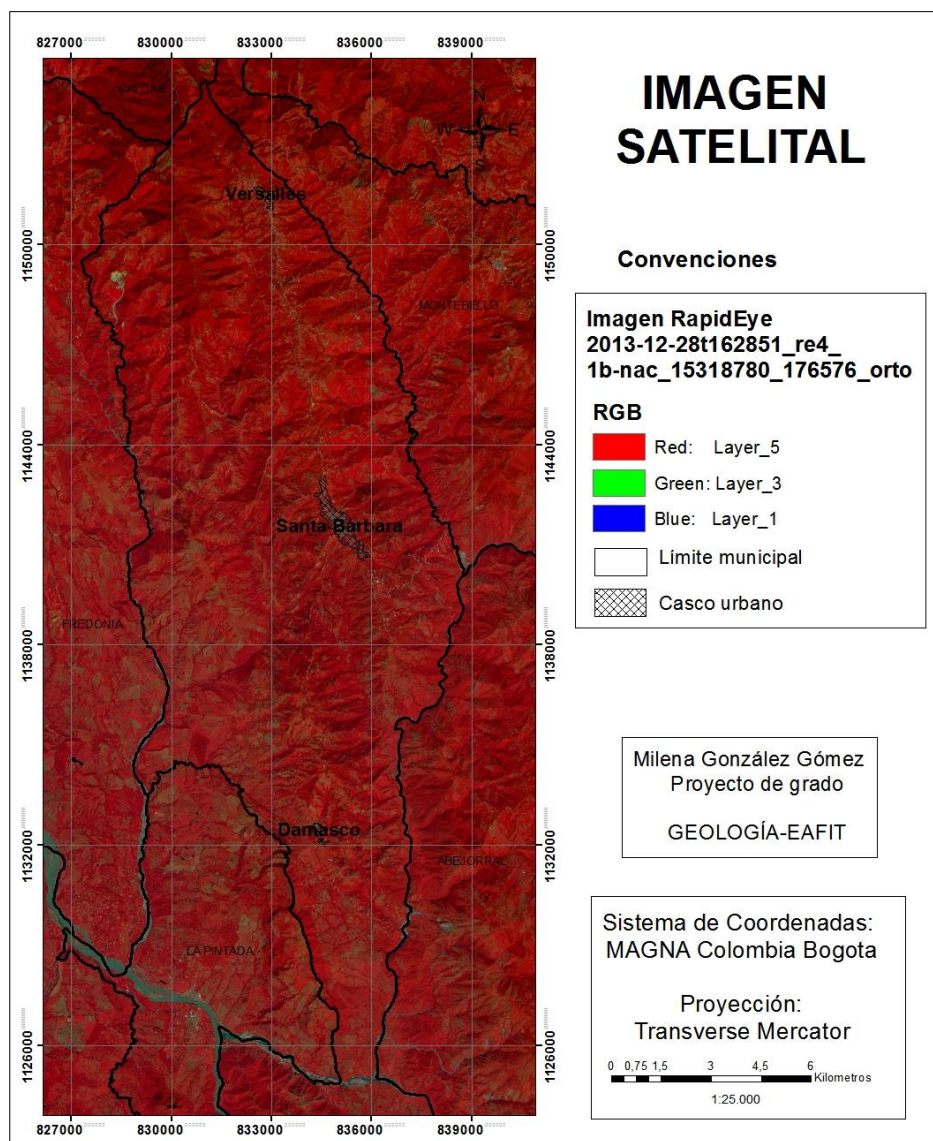


Figura 6. Imagen satelital RapidEye 2013-12-28t162851\_re4\_1b-nac\_15318780\_176576\_orto.



Figura 7. Cobertura del municipio de Santa Bárbara en Google Earth.



## **5. GENERALIDADES DEL AREA DE ESTUDIO**

En este capítulo se encuentran diferentes aspectos o características del municipio de Santa Bárbara, como lo son su localización, clima, suelos, geología regional y geomorfología regional.

### **5.1 LOCALIZACIÓN**

El municipio de Santa Bárbara está ubicado en el flanco occidental de la cordillera Central, al suroeste del departamento de Antioquia (Figura 8); ocupa el 0.3% de la extensión total del departamento y el 3.3% del territorio del suroeste.

El municipio está localizado entre las coordenadas 5° 52' 32" de latitud norte y a 75° 33' 48" de longitud oeste y ocupa una extensión total de 491 Km<sup>2</sup>. Limita al norte con el municipio de Caldas; sirviendo de límite el Alto de Minas; al este con el municipio de Montebello y Abejorral, siendo el límite la quebrada Sabaletas y el río Buey, respectivamente; al oeste con el municipio de Fredonia, sirviendo de límite el río Poblano; y al sur con el municipio de La Pintada y el departamento de Caldas, sirviendo de límite el cerro Amarillo y el río Arma, respectivamente.

La cabecera del municipio esta situada a 1800 msnm y se encuentra a 53 Km de Medellín por la troncal Occidental. Santa Bárbara cuenta con 42 veredas y 2 corregimientos: Versalles y Damasco.



SGC, bibliotecas de la universidad EAFIT y la universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, DAPARD y el Centro de Información Ambiental de CORANTIOQUIA (CIA). El inventario de movimientos en masa recopilado de SIMMA se encuentra georreferenciado, por lo tanto sirvió como un insumo en el momento de la identificación y delimitación de los procesos. Toda esta información se encuentra almacenada en tablas, donde se describe su utilidad para este estudio (ver Anexo 1).

### **5.3 CLIMA**

De acuerdo con el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) del municipio de Santa Bárbara, realizado en el año 2003, el área de estudio cuenta con tres zonas de vida predominantes, para las cuales se utilizó el sistema de clasificación de pisos bioclimáticos y las zonas de vida de Holdridge . Las zonas de vida son extensiones de terreno que tienen condiciones ambientales similares que han facilitado la adaptación de plantas y animales a ambientes que son favorables para su desarrollo y supervivencia (IGAC, 2007). A continuación se presentan las características definidas para las zonas de vida del municipio.

#### **5.3.1 BOSQUE SECO TROPICAL (BST):**

Altitud: de 600 a 850 m.s.n.m.

Temperatura: > 24° C.

Pluviosidad: 500 a 1000 y 1000 a 2000 mm

Balance hídrico: - 850 mm y – 1000 mm.

#### **5.3.2 BOSQUE MUY HUMEDO PREMONTANO (bmhPM):**

Altitud: de 850 a 2.000 m.s.n.m.

Temperatura: 17 a 24° C.

Pluviosidad: de 2.000 a 4.000 mm

Balance hídrico: + 1.800 mm

Se considera como áreas forestales protectoras todas las tierras ubicadas en regiones cuya precipitación este entre 2000 y 4000 mm al año y su pendiente esté comprendida entre 51 y 100%.

### **5.3.3 BOSQUE MUY HUMEDO MONTANO BAJO (BMHmb):**

Altitud: de 2.000 a 2.800 m.s.n.m.

Temperatura: 12 a 17° C

Pluviosidad: de 2.000 a 4.000 mm.

Balance hídrico: + 2250 mm

Se considera como áreas forestales protectoras todas las tierras ubicadas en regiones cuya precipitación estén entre 2000 y 4000 mm al año y su pendiente esté comprendida entre 51 y 100%.

## **5.4 SUELOS**

Según el estudio realizado por el IGAC (2007), los suelos del municipio de Santa Bárbara pertenecen a las Asociaciones Santa Bárbara (BS), Gemelos (GA) Ituango (IT), Angelópolis (AE) y Horizontes (HB), para las cuales se describen sus características principales a continuación.

### **5.4.1 ASOCIACIÓN SANTA BÁRBARA (SB)**

Esta asociación cuenta con un clima templado húmedo a muy húmedo con un período seco prolongado y corresponde a las zonas de vida de bosque húmedo premontano (bh-PM) y bosque muy húmedo premontano (bmh-PM). Estos suelos se han desarrollado a partir de rocas ígneas (diabasas, basaltos, tobas y dioritas), con cobertura discontinua de cenizas volcánicas. Morfológicamente pertenece al paisaje de montaña y tipo de relieve de filas y vigas. Las pendientes varían de 12 a 75%, con relieve fuertemente ondulado a moderadamente escarpado. En general los suelos son profundos, limitados por gravilla y cascajo; bien drenados, alta saturación de aluminio, reacción extremada a ligeramente ácida, fertilidad alta a moderada y erosión ligera a moderada.

La asociación está conformada los suelos Andic Dystrudepts (50%); Typic Dystrudepts (30%), e inclusiones en un 10% de los suelos Oxic Dystrudepts y Humic Eutrudepts (IGAC, 2007).

### **5.4.2 ASOCIACIÓN GEMELOS (GA)**

Está caracterizada por un clima cálido seco y corresponde a la zona de vida de bosque seco tropical (bs-T). Geomorfológicamente pertenece al tipo de paisaje de montaña y su tipo de

relieve es de espinazos. Las pendientes varían de 12-75%. Estos suelos se han desarrollado a partir de rocas sedimentarias (areniscas, arcillolitas, conglomerados), son profundos y superficiales, limitados por pedregosidad, están bien a excesivamente drenados, de texturas moderadamente finas a finas, reacción fuertemente ácida a neutra, fertilidad alta a moderada, erosión ligera a severa y movimientos en masa tipo terracetas y cárcavas.

La asociación está formada por los suelos Typic Haplustepts 30%, Lithic Haplustepts 25%, Lithic Ustorthents 25% y Typic Ustorthents 20% (IGAC, 2007).

#### **5.4.3 ASOCIACIÓN ITUANGO (IT)**

Presenta un clima templado muy húmedo y húmedo y corresponde a las zonas de vida de bosque muy húmedo premontano (bmh-PM) y bosque húmedo premontano (Bh-PM). Geomorfológicamente comprende filas y vigas de montaña, en las cuales se encuentran pequeños coluvios y afloramientos rocosos. El relieve varía de moderadamente inclinado a moderadamente escarpado, las cimas o crestas son agudas, algunas redondeadas; las pendientes oscilan de 7 a 75%. Los suelos, desarrollados a partir de rocas metamórficas (varias clases de esquistos con intercalaciones de neiss, anfibolitas, cuarcitas y materiales calcáreos), son de texturas finas a medias, bien drenados, profundos, limitados en algunas ocasiones por factores físicos o químicos; gravillas, piedras en el perfil, roca cerca de la superficie o toxicidad por aluminio; presentan erosión por escurrimiento difuso, surcos, terracetas y movimientos en masa localizados; el grado de erosión llega a ser muy severo en algunos sectores.

Forman la asociación los suelos Typic Eutrudepts (35%), Typic Dystrudepts (30%), Oxic Dystrudepts (20%), e inclusiones de Acrudoxic Kandiodults (5%), Humic Eutrudepts (5%) y Humic Dystrudepts (5%) (IGAC, 2007).

#### **5.4.4 ASOCIACIÓN ANGELOPOLIS (AE)**

Se caracteriza por un clima templado húmedo a muy húmedo y corresponde a las zonas de vida de bosque muy húmedo premontano (bmh-PM) y bosque húmedo premontano (bh-PM). Geomorfológicamente la unidad corresponde al paisaje de montaña y tipo de relieve de espinazos. El relieve es moderadamente ondulado a moderadamente escarpado con pendientes mayores del 7%. Los suelos son desarrollados a partir de rocas sedimentarias del Terciario (areniscas, arcillolitas, filitas y conglomerados), son profundos, bien drenados, de texturas moderadamente gruesas a finas; presentan erosión hasta grado moderado, por escurrimiento difuso, surcos, pequeñas cárcavas y movimientos en masa, especialmente

terracetas. En la superficie pueden encontrarse en forma localizada cascajos, piedras de diferente tamaño y algunos afloramientos rocosos. La fertilidad es baja a moderada.

Forman la asociación en un 50% los suelos Typic Dystrudepts, 35% por suelos Humic Dystrudepts e inclusiones del 15% por suelos Oxic Dystrudepts (IGAC, 2007).

#### **5.4.5 ASOCIACIÓN HORIZONTES (HB)**

Comprende un clima frío muy húmedo y corresponde a las zonas de vida de bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB). Geomorfológicamente hace parte de las filas y vigas de montaña formadas por laderas irregulares, largas, convexas o rectilíneas, faldas y cimas estrechas. El relieve es fuertemente ondulado a muy escarpado, con pendientes mayores del 12%. Los suelos se han desarrollado a partir de rocas ígneas (diabasas, basaltos, dioritas) y en las áreas más al sur, de cenizas volcánicas; son profundos a superficiales, limitados por gravillas y piedras, de texturas al tacto moderadamente finas y medias con fragmentos de roca, reacción muy fuerte y fuertemente ácida y fertilidad baja; presentan erosión ligera, frecuentes a abundantes movimientos en masa localizados.

La asociación la forman los suelos Typic Fulvudands (50%), Typic Udorthents (30%) y Humic Dystrudepts (20%) (IGAC, 2007).

### **5.5 MARCO GEOLOGICO REGIONAL**

A nivel regional las evidencias geológicas existentes sugieren que la margen septentrional del continente Suramericano tuvo un límite convergente a partir del Jurásico medio hasta el Cretáceo temprano. Durante ésta época el límite fue de tipo andino, por la interacción de una placa oceánica y una placa continental. Sin embargo en tiempo post-Barremiano el modelo tectónico es más complejo y se incorporan probablemente a él arcos de islas autóctonos o alóctonos (Botero et al, 1991).

La zona al este del área de estudio se encuentra caracterizada por la presencia de las rocas más antiguas del área, afloran neises cuarzo feldespáticos posiblemente del Precámbrico, esquistos cuarzo sericíticos y anfibólicos, cuarcitas y sedimentos de bajo grado de metamorfismo del Paleozoico Inferior, que fueron plegados e intruídos por neises sintectónicos durante la orogenia Herciniana, constituyendo parte de la Cordillera Central.

Durante el Triásico y desde finales del Jurásico hasta principios del Cretácico, ésta zona experimentó otros eventos magmáticos durante los cuales se intruyeron los Stocks de Amagá y Honda del Triásico, y el de Pueblito del Cretáceo Inferior, mientras que en su borde occidental se formaba una gran fosa geosinclinal donde se irían a depositar los productos

de la erosión de la Cordillera Central. En esta zona se desarrollaron varios procesos de sedimentación y volcanismo que generaron la Formación Quebradagrande, la cual comprende dos miembros: uno volcánico constituido por diabasas, espilitas y tobas, con intercalaciones locales de chert y de lavas almohadilladas que definen un ambiente marino para su generación; y otro sedimentario compuesto por sedimentos cretácicos marinos, pelágicos y terrígenos; dicha formación aflora al este del río Cauca y constituye parte de la vertiente occidental de la cordillera Central.

A finales del Cretáceo se produce una fuerte orogenia que interrumpe el ciclo de sedimentación marina, pliega los sedimentos permitiendo la continentalización de la Formación Quebradagrande (la cual comprende la mayor área del municipio) y el levantamiento de la cordillera Occidental conformada por rocas volcánicas y sedimentarias del Grupo Cañasgordas. En este intervalo son emplazados tectónicamente cuerpos ultrabásicos e intruyen de nuevo magmas gabroides de composición más ácida las unidades de la zona oriental.

El levantamiento leve de la cordillera Occidental a finales del Cretáceo, permite la formación de la fosa del Cauca donde en medio de un ambiente fluvio lacustre, se depositan en el Terciario Medio los sedimentos continentales de la Formación Amagá, la cual incluye grandes depósitos carboníferos.

El plegamiento andino del Terciario Superior genera nuevas zonas de debilidad o removiliza las ya existentes, permitiendo la manifestación del volcanismo piroclástico de la Formación Combia y la subsiguiente intrusión de los pórfidos andesíticos, que complementan la constitución litológica de la zona central.

La zona más al oeste dominada por el sistema de Falla del Cauca, parece tener un tectonismo más intenso pero la cobertura sedimentaria y volcánica (Formación Amagá y Formación Combia) impide su determinación.

Durante el Pleistoceno las variaciones tectónicas y climáticas contribuyeron a la formación de los aluviones que hoy rellenan los valles de algunos ríos y quebradas. Durante el Holoceno disminuyó el volcanismo en la cordillera Central, sin embargo, la presencia de cenizas volcánicas en los perfiles de suelo a grandes distancias de los centros volcánicos conocidos, indican que el volcanismo continuó hasta una época relativamente reciente. La intensa erosión y la actividad humana han ayudado en los últimos tiempos a dar a la zona su configuración actual (INGEOMINAS, 1980a) (Figura 9).

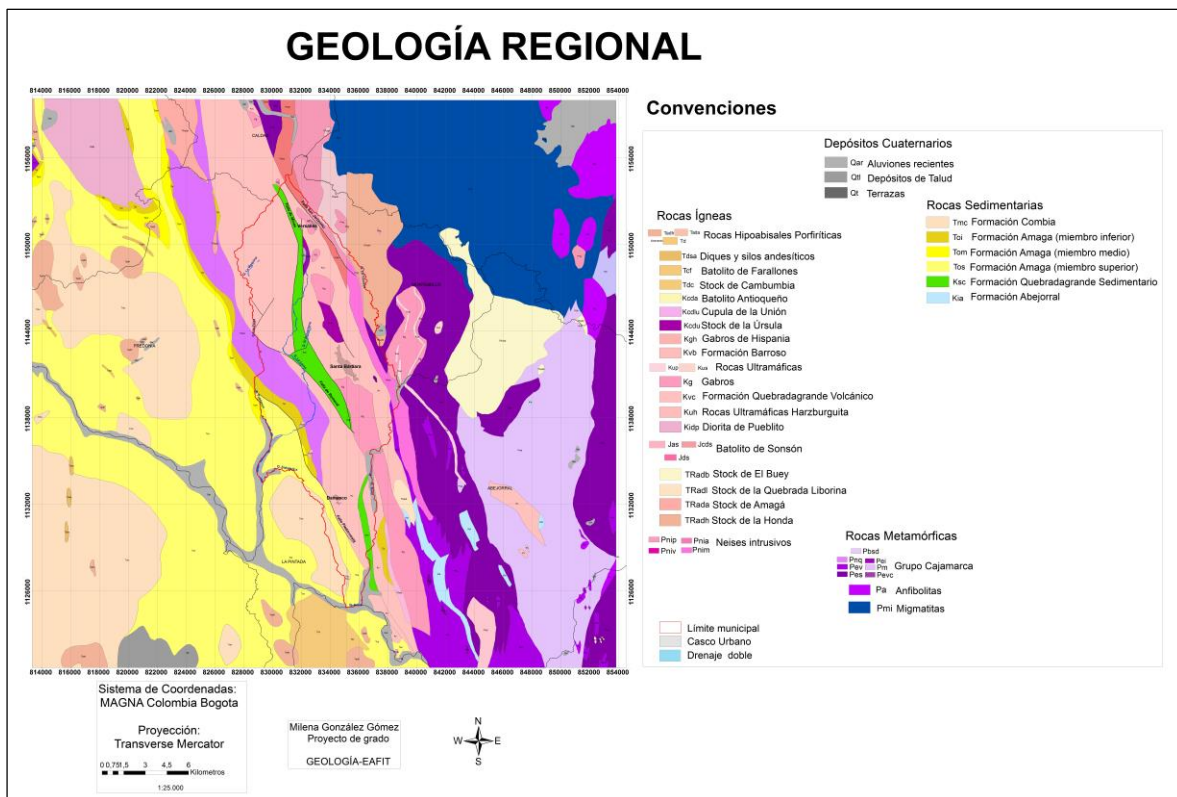


Figura 9. Mapa de la geología regional del municipio de Santa Bárbara, Antioquia. Tomado de las planchas 166 Jericó y 167 Sonsón (INGEOMINAS, 1980b y 1980c).

## 5.6 MARCO ESTRUCTURAL REGIONAL

La zona de estudio se encuentra en el flanco occidental de la cordillera Central, caracterizada por altas cadenas de montañas que han sufrido un intenso plegamiento, fallamiento, levantamientos y eventos magmáticos durante los distintos episodios orogénicos (INGEOMINAS, 1978).

La tectónica del área presenta contrastes bien definidos, la falla de Sabanalarga al oeste, la de Romeral en la parte central y la de San Jerónimo al este; asociadas a estas fallas se encuentran varias fracturas paralelas y perpendiculares, las cuales también ejercen un fuerte control estructural en el área. Hacia el este del río Cauca se encuentra el Sistema de Falla Romeral, el cual tiene dirección predominante Norte-Sur y está compuesto por tres fallas paralelas a sub-paralelas que se entrecruzan en algunos sitios. El extremo oeste de la falla de Romeral representaría el límite entre corteza densa y delgada (probablemente oceánica) y corteza continental y además, marca el límite geológico entre la cordillera Central y la Occidental.



El sistema Romeral presenta las siguientes características en esta área: alineamientos fisiográficos, terminación brusca en pliegues, fallas y otras características estructurales, contactos fallados con desarrollo de zonas cataclásticas y milonitizadas, bloques exóticos dentro de una unidad roca dada, anomalías gravimétricas y/o magnéticas, zonas de deslizamientos alineados (quebradas La Loma y Las Frías), agrupamiento de unidades formadas en distintos ambientes y de edad geológica muy diferente y efectos de metamorfismo dinámico de intensidad variable.

La falla de San Jerónimo se ha considerado como el límite este de la zona de falla de Romeral, posee una dirección general Noroeste. Grosse en INGEOMINAS (1978) la considera como una falla inversa con buzamiento al este y grandes desplazamientos verticales, sin embargo su longitud considerable (más de 80 km) y el contraste litológico bien marcado a ambos lados de la traza sugiere que es más bien una falla de rumbo, con un gran desplazamiento lateral.

Hay claras evidencias del Sistema de falla del Cauca, cuya expresión principal es la falla de Sabanalarga. Este tectonismo parece tener la misma historia del Sistema Romeral. Las relaciones de campo indican que por lo menos ha tenido removilizaciones post-pliocenas. Algunos autores afirman que el movimiento más reciente del sistema Cauca, es transcurrente con desplazamiento lateral derecho, lo cual también se cumpliría para el Sistema Romeral.

Al oeste del río Cauca hay una zona donde es más visible un sistema tectónico, caracterizado por la presencia de fallas y lineamientos de gran expresión dinámica y geomórfica, con orientaciones diferentes bien marcadas según: N-NE, S-N y NNW. Las fallas más notorias son: Mistrató conocida más al norte como Guasabra, Remolino, La Mansa, San Juan y gran lineamiento de dirección N-NW que coincide con el cambio de rumbo del río Cauca al sur de Bolombolo (INGEOMINAS, 1980a) (Figura 10).



Posterior al plegamiento y quizás antes del volcanismo del Terciario Superior o contemporáneo con él, la zona fue afectada por un fuerte tectonismo que le imprimió las características estructurales típicas de bloques fallados donde rocas paleozoicas, mesozoicas y cenozoicas están en contactos fallados. Este tectonismo parece tener removilizaciones post-pliocenas según lo indica el diaclasamiento y cizallamiento en las rocas más rígidas de la Formación Combia como son los basaltos (INGEOMINAS, 1980a).

## 5.7 MARCO GEOMORFOLOGICO REGIONAL

Según el mapa geomorfológico, de amenazas y de áreas degradadas de la jurisdicción de CORANTIOQUIA a escala 1:100.000, realizado en el año 2002, en la zona de estudio se encuentran las unidades de relieve Superficie de Erosión Belmira-San Miguel-Sonsón, Cañón del río Cauca- San Juan y Frente Erosivo del Arma (Figura 11).

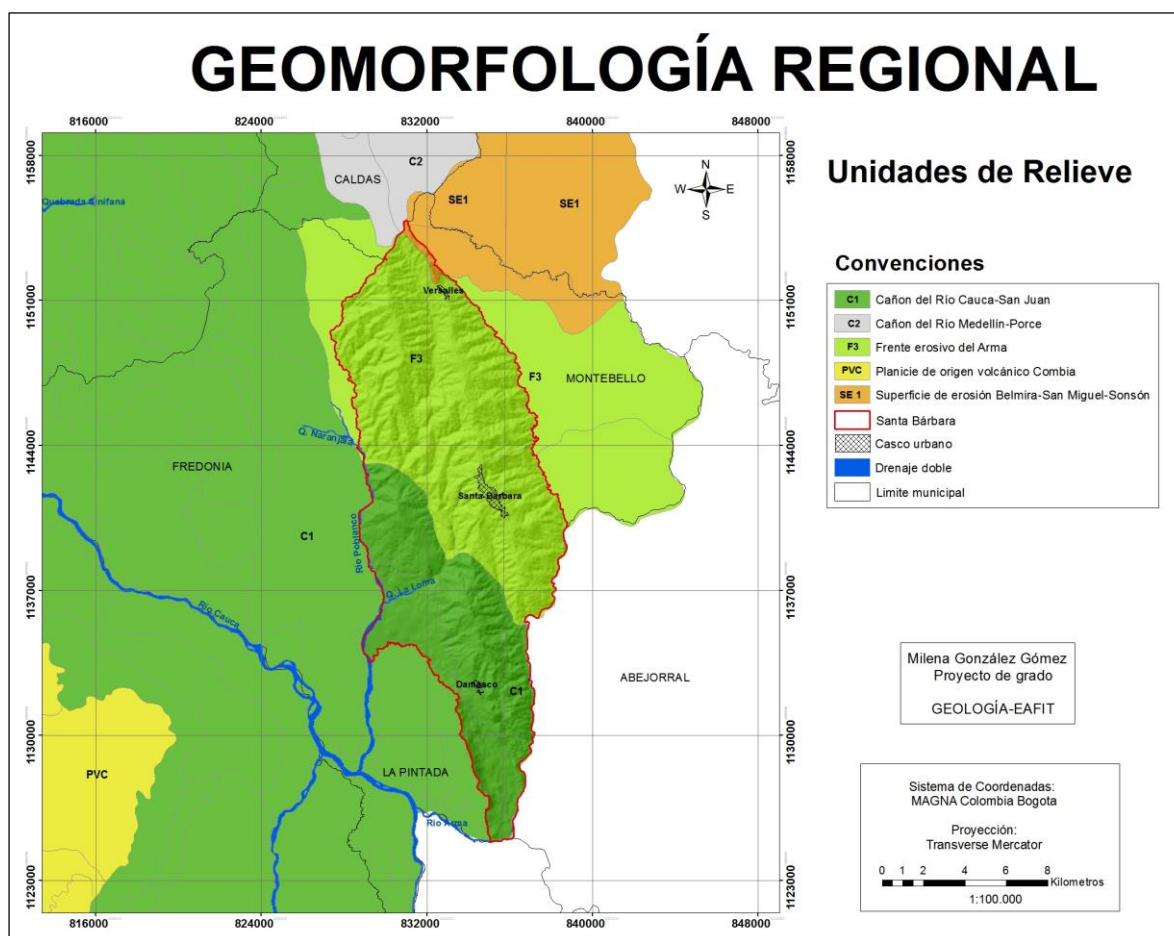


Figura 11. Mapa de las unidades de relieve del municipio de Santa Bárbara, Antioquia. Tomado de CORANTIOQUIA, 2002.

Para cada una de dichas unidades de relieve, se describen, a continuación las unidades geomorfológicas que se encuentran en el área de estudio (Figura 12).

#### 5.7.1. SUPERFICIE DE EROSIÓN BELMIRA - SAN MIGUEL - SONSÓN

Las superficies de erosión son entendidas como una porción de terreno que se forma al nivel del mar, en ambientes tropicales de clima variado y que se comporta como una planicie levemente ondulada sin grandes desniveles. Estas planicies originales son afectadas por procesos tectónicos e isostáticos que generan levantamientos o por cambios en el nivel base de la erosión, siendo afectadas a través de su levantamiento por los cambios climáticos. El resultado de estos procesos climáticos y tectónicos generan un relieve escalonado en las cadenas montañosas, el cual registra las diferentes fases de levantamiento al cual se vio sometido, permitiendo realizar una interpretación genética y cronológica de la estructura del relieve.

La Superficie de Erosión Belmira - San Miguel - Sonsón, cuenta con las unidades geomorfológicas: **Filos de topes subredondeados** (sistema de filos que se desprenden del sector de la cuchilla de San Antonio a los 2800 msnm hasta los 2000 msnm, con topes subredondeados estrechos en dirección este-oeste, sus flancos tienen formas cóncavas, inclinaciones de 16 a 35° y longitudes entre 1500 y 2000 m) y **Cerros de topes subredondeados** (cerros ubicados a alturas entre los 2000 y 2500 msnm, de topes subredondeados estrechos, base alargada en dirección este-oeste). Dichas unidades se ubican al norte del casco urbano del corregimiento de Versailles y los principales procesos son los deslizamientos (CORANTIOQUIA, 2002).

#### 5.7.2 CAÑÓN DEL RÍO CAUCA-SAN JUAN

Los cañones son valles con encajamientos significativos que se forman por cambios en el nivel base de la erosión, reflejando un aumento de la incisión vertical y que se encuentran segmentando los altiplanos.

Para la zona de estudio, se encuentran las siguientes unidades geomorfológicas definidas para el Cañón del río Cauca-San Juan: **Cerros de topes alargados** (localizados al sur del casco urbano del municipio de Santa Bárbara, ubicado entre el río Poblano al occidente y la quebrada La Loma al oriente, son cerros a alturas entre los 800 y 1600 msnm, con topes subredondeados amplios, de base alargada con longitudes de 5 a 9 Km, sus flancos tienen formas convexas, inclinaciones entre los 30 y 55°, longitudes entre 2000 y 2500 m. En esta unidad los principales procesos de remoción en masa son los deslizamientos y caída de rocas); **Vertientes estructurales** (en la margen derecha del río Poblano, son vertientes

donde se observan las estructuras sedimentarias heredadas de las rocas terciarias volcano sedimentarias de la Formación Combia y/o sedimentarias de la Formación Amagá, en algunas partes aparecen como superficies levemente inclinadas de formas planas a convexas); **Cerros estructurales** ( representado por el Cerro Amarillo localizado en la margen derecha del río Arma, una altura ente 600 y 1400 msnm, es de tope plano, base ancha, sus flancos tienen formas planas, inclinaciones entre los 35 y 55° hasta verticales, longitudes de 500 a 800 m y con una incisión baja a nula. Los principales procesos son los movimientos en masa lentos tipo reptación); **Escarpes cortos** (ubicado en ambos costados del cerro volcánico Cerro Amarillo, son escarpes que se caracterizan por tener en promedio de 800 a 1000 m de longitud, inclinaciones entre los 45° hasta verticales, de formas planas a irregulares, con valles en forma de “V” cerrada con una incisión que no supera los 50 m; sus principales procesos son las caídas de rocas); **Terrazas aluviales** (en ambas márgenes del río Poblano en una franja estrecha en dirección norte sur, éstas terrazas se encuentran localizadas por debajo de los 600 m.s.n.m, conservan una forma plana con pendientes entre 0 y 2°, drenaje incipiente y el material que las constituyen son sedimentos aluviales sin consolidar que varían de arcillas a gravas. En esta unidad no hay presencia de procesos aunque es posible que en algunas partes de las márgenes de las terrazas ocurran procesos asociados a la socavación lateral) y **Llanura aluvial** (hacia el sur del río Poblano, áreas compuestas por pequeñas islas, orillares, cauces abandonados y antiguos diques, donde el río con sus continuas crecientes y cambios de curso, ha depositado generalmente arcillas, limos y arenas finas) (CORANTIOQUIA, 2002).

### 5.7.3 FRENTE EROSIVO DEL RÍO ARMA

En general, los frentes erosivos son superficies donde se da, en la actualidad, la mayor concentración de procesos denudativos; en términos generales separa una zona alta de una más baja. Estas unidades presentan un relieve montañoso típico del proceso remontante de la erosión a través de numerosas fuentes hídricas.

Para el Frente Erosivo del río Arma se han definido las siguientes unidades geomorfológicas en la zona de estudio: **Filos de topes subredondeados estrechos** (corresponde a un sistema de 2 filos, el primero se desprende desde el alto de Minas hasta la población de Poblano entre el río Poblano y la quebrada la Loma, el segundo desde el casco urbano del municipio de Versalles hasta el casco urbano del municipio de Santa Bárbara, entre las quebradas la Loma y Sabaletas, tienen topes subredondeados estrechos, flancos con formas planas a irregulares, inclinaciones entre 35 y 55°, longitudes entre 1500 y 3000 m. En esta unidad los principales procesos morfodinámicos son erosión laminar, desgarres superficiales y deslizamientos inactivos) y **Filos de topes subredondeados amplios** (es un filo que parte desde el casco urbano del municipio de Santa Bárbara hasta el río Buey entre las quebradas

Colozal y la Tolda al occidente y Sabaletas al oriente, tiene tope subredondeado amplio, sus flancos son irregulares, con inclinaciones entre los 35 y 55°, longitudes entre los 1500 y 3000 m, valles con forma de “V” cerrada. En esta unidad los principales procesos morfodinámicos son deslizamientos y erosión laminar) (CORANTIOQUIA, 2002).

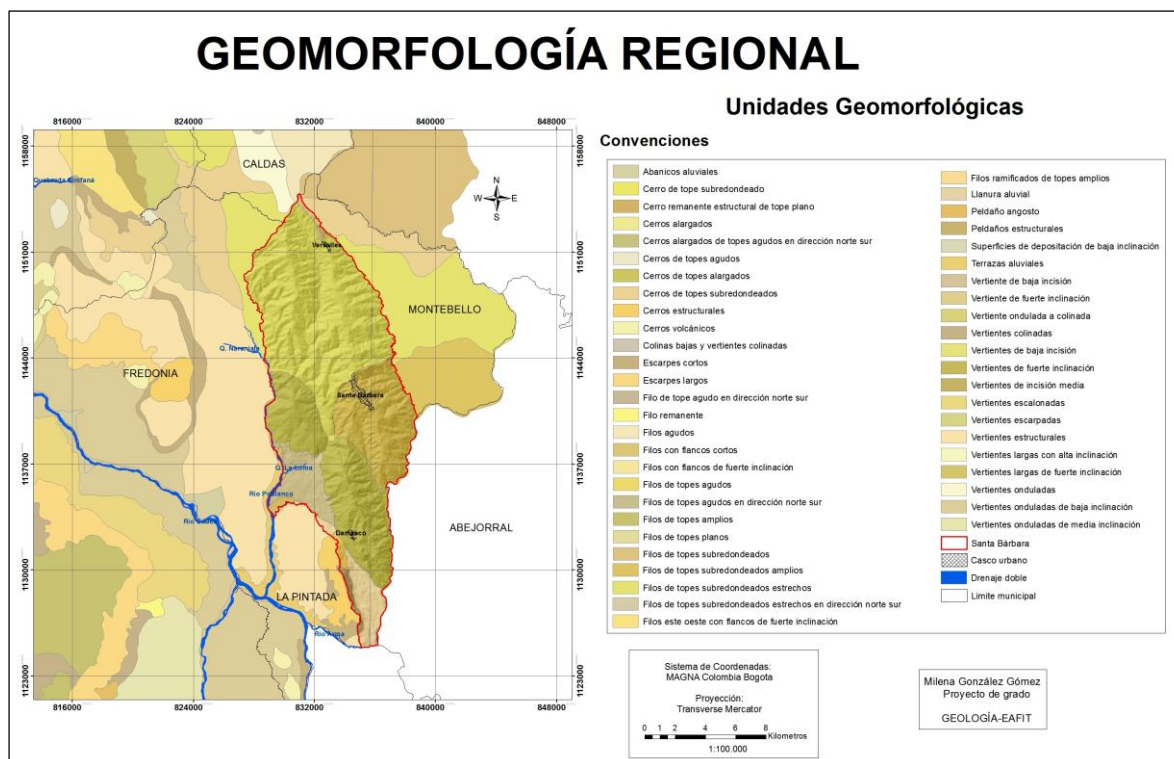


Figura 12. Mapa de las unidades geomorfológicas del municipio de Santa Bárbara, Antioquia. Tomado de CORANTIOQUIA, 2002.

## **6. VARIABLES PARA LA ZONIFICACION DE AMENAZAS**

La zonificación de amenaza por movimientos en masa, requiere contar con mapas temáticos que contienen información interdisciplinaria relacionada, tales como, la geología, geomorfología, cobertura de la tierra, pendiente, relieve relativo, entre otros.

### **6.1 VARIABLES MORFOMÉTRICAS**

Son las variables cuantitativas que se derivan del modelo digital de elevación (DEM) a partir de procesos de información SIG, como lo son la pendiente, la curvatura, la rugosidad y el relieve relativo, las cuales se describen para el área de estudio a continuación.

#### **6.1.1 PENDIENTES**

La pendiente se define como el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal. Su valor se expresa en grados de 0° a 90° o en porcentaje, se relaciona con los movimientos en masa (debido a que estos constituyen un fenómeno de tipo gravitacional), de manera que a mayor el grado de pendiente aumenta la susceptibilidad a los movimientos en masa (SGC, 2013). Esta variable se relaciona directamente con la aparición de roturas dado que es el principal factor geométrico que aparece en los análisis de estabilidad, las tensiones de corte tangencial y normal en la formación superficial, e influye también en la distribución de agua en las laderas (Londoño, 2006).

Para el municipio de Santa Bárbara, esta variable muestra principalmente un predominio de pendientes fuertes (40-60%) representando el 29,54% de la zona de estudio y muy fuertes (60-100%) con un 27,63%, estos valores se encuentran distribuidos a lo largo de todo el municipio, especialmente al norte, centro y sureste.

Las zonas de pendientes moderadas (25-40%) y suaves (10-25%), comprenden un 17,34% y 14,33% del área del municipio, respectivamente, estas pendientes presentan una distribución moderada y se encuentran localizadas de manera continua a lo largo de la zona de estudio.

Las zonas de pendientes muy suaves (3-10%) ocupan el 6,07% de la zona de estudio y están localizadas principalmente en las cimas y al sur del municipio cerca de los ríos Poblano y Buey; de la misma manera se encuentran las pendientes planas (0-3%) que representan el 2,28%, siendo éstas las que menor área ocupan en el municipio.

Por último las pendientes escarpadas (>100%), se encuentran muy poco distribuidas, corresponden al 2,81% de la zona de estudio, y se ubican esencialmente en la zona sur del municipio, en el escarpe del cerro Amarillo y en menor medida, distribuidas al norte, centro y sureste de Santa Bárbara. En la siguiente tabla se presenta la distribución de los diferentes rangos de pendientes y la descripción para cada uno de éstos; y en la figura 13 el mapa de pendientes del municipio.

Tabla 2. Descripción del atributo Pendiente.

<b>INTERVALOS PORCENTAJE</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>TOTAL ÁREA (ha)</b>	<b>PORCENTAJE (%)</b>
0-3%	Plano	409,61	2,28
3-10%	Muy suave	1090,40	6,07
10-25%	Suave	2574,54	14,33
25-40%	Moderado	3114,42	17,34
40-60%	Fuerte	5306,77	29,54
60-100%	Muy fuerte	4962,80	27,63
>100%	Escarpado	505,29	2,81



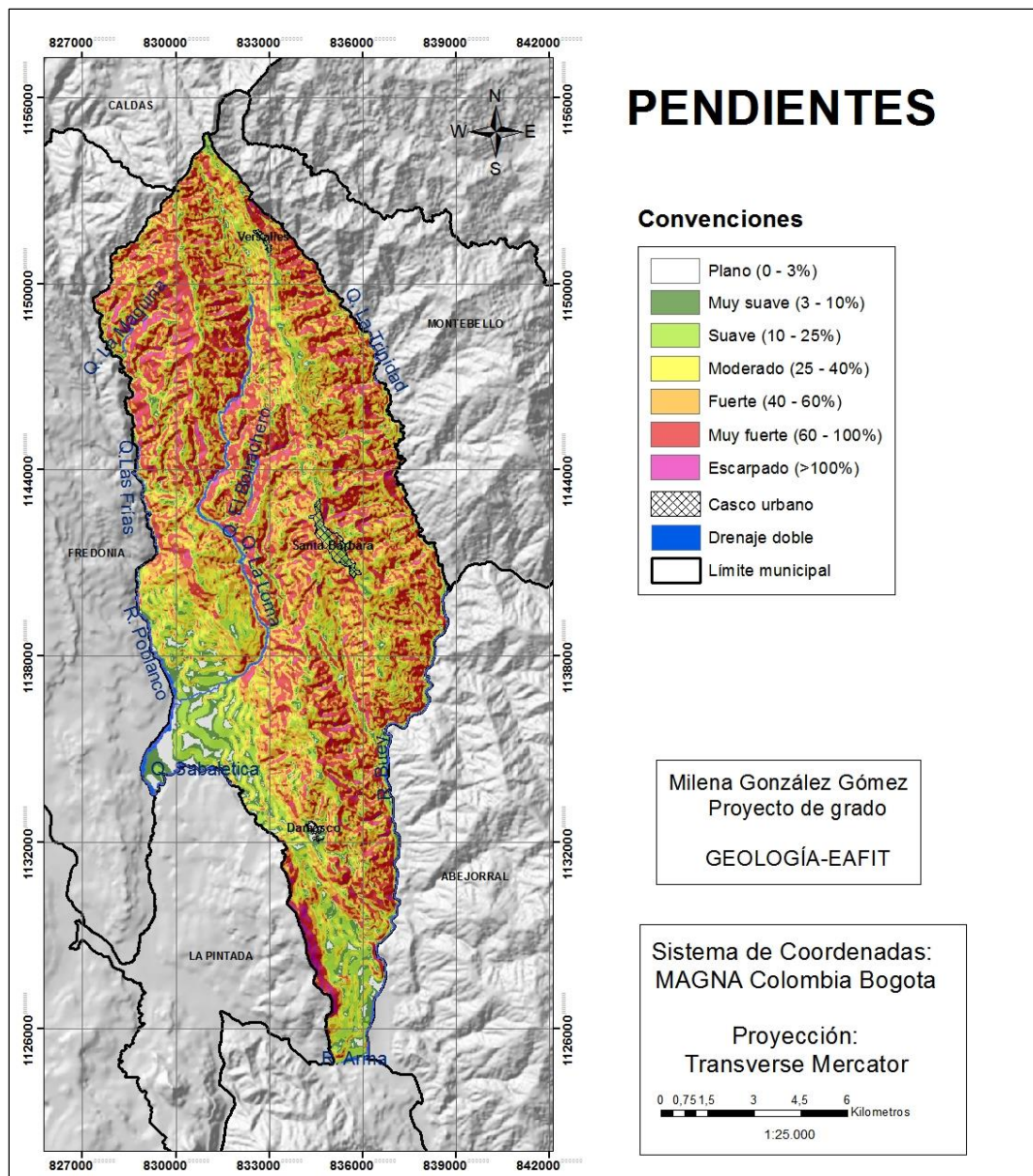


Figura 13. Mapa de pendientes del municipio de Santa Bárbara, Antioquia.

### 6.1.2 CURVATURA

La curvatura determina el grado de convexidad o concavidad de la superficie en la dirección de la pendiente (longitudinal). Es considerada sólo en dos dimensiones: la vertical y la dirección de la pendiente; el valor 0 indica que la superficie es plana, valores positivos indican que la superficie es cóncava y valores negativos indican convexidad. Esta variable muestra la efectividad de la topografía para concentrar o dispersar la mayor cantidad de agua de lluvia en un punto determinado de la ladera. Dado que representa el relieve según la dirección de la máxima pendiente, esta variable afecta a la infiltración, la escorrentía y la

aceleración y desaceleración del flujo, y por lo tanto influye en la erosión y deposición de material en la superficie del terreno. Esta variable se relaciona con los movimientos en masa, en la medida en que indica el grado de concentración o dispersión del drenaje superficial (Londoño, 2006).

La distribución de la variable curvatura para Santa Bárbara muestra un predominio de las zonas convexas y cóncavas, representando el 51,34% y 48% del total del área del municipio, respectivamente. Estas zonas se encuentran distribuidas de manera general a lo largo de toda la zona de estudio, las partes convexas por ejemplo sobresalen en las cimas y las cóncavas en los cauces de ríos o quebradas. Los valores convexas indican que el flujo se dispersa y los cóncavos indican que el flujo se concentra hacia la celda, y se puede esperar un aumento en la presión de agua en los poros. Se destaca que los demás valores de curvatura no presentan un porcentaje importante en el área total de estudio, debido a la homogeneidad de esta variable.

En la siguiente tabla se puede observar la descripción para la variable curvatura, según los distintos rangos utilizados y en la figura 14 el mapa de dicha variable para Santa Bárbara.

Tabla 3. Descripción del atributo Curvatura.

INTERVALOS	DESCRIPCIÓN	TOTAL ÁREA (ha)	PORCENTAJE (%)
<-2	Muy convexo	22,57	0,13
-2 - 0,001	Convexo	9223,26	51,34
-0,001 - 0,001	Plano	43,97	0,24
0,001 - 2	Cóncavo	8622,59	48
>2	Muy cóncavo	51,22	0,29

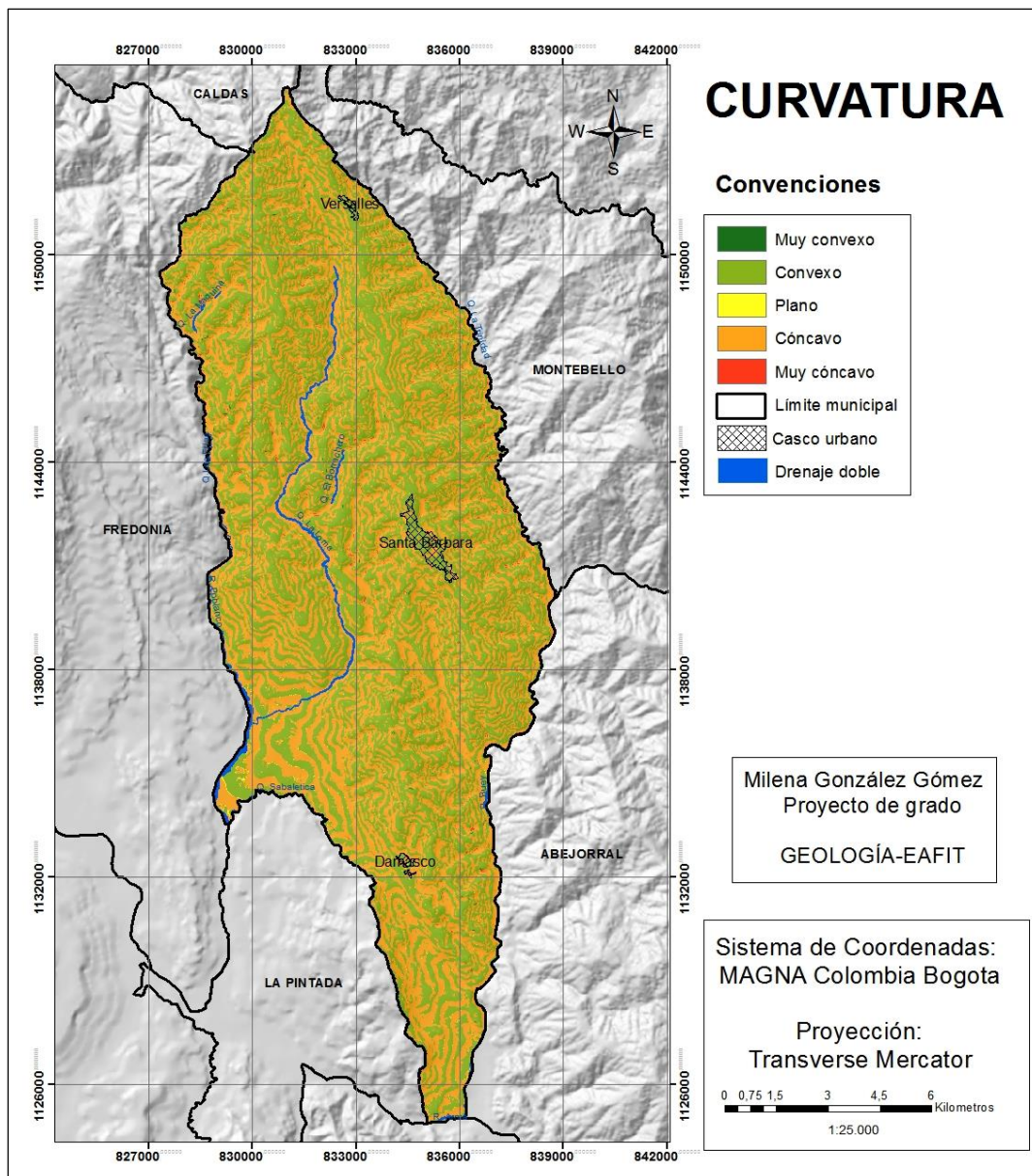


Figura 14. Mapa de curvatura del municipio de Santa Bárbara, Antioquia.

### 6.1.3 RUGOSIDAD

La rugosidad del terreno se define como la variación de la pendiente en un área y representa la desviación del vector normal a la superficie en cada celda. El valor 1 corresponde a rugosidad nula y los valores se hacen menores al aumentar la dispersión de los vectores (alta rugosidad) (SGC, 2013).

La rugosidad define bien formas como los límites de taludes y laderas tanto en los valles como en las crestas. En términos de amenaza, se relaciona con los movimientos en masa,

de manera que las laderas de rugosidad alta son más propensas a presentar deslizamientos debido a que los cambios sucesivos de pendiente favorecen una mayor infiltración del agua en el terreno y su inestabilidad (Londoño, 2006).

Esta variable muestra un patrón muy diferenciable para el municipio debido a que se presenta una distribución bastante heterogénea. Las zonas con rugosidad media predominan en el área de estudio, representando el 37,53% del total del área y se encuentra distribuida de manera general a lo largo de todo el municipio.

Las zonas de rugosidad alta y muy alta representan el 28,3% del área del municipio y se localizan en la zona noroeste del casco urbano de Santa Bárbara, al sureste del casco urbano del corregimiento de Damasco y al sur del municipio en el escarpe de cerro Amarillo.

Las zonas de rugosidad baja y muy baja representan el 34,17% del total del municipio y su distribución se concentra hacia el suroeste y sureste del municipio en la vereda Poblano y en la vereda Buey, respectivamente.

En la tabla 4 se presenta la descripción para cada uno de los rangos utilizados en la reclasificación del mapa de rugosidad y en la figura 15 el mapa de dicha variable.

Tabla 4. Descripción del atributo Rugosidad.

<b>INTERVALOS</b>	<b>DESCRIPCIÓN RUGOSIDAD</b>	<b>AREA TOTAL (ha)</b>	<b>PORCENTAJE (%)</b>
0,88	Muy alta	838,21	4,67
0,91	Alta	4246,54	23,63
0,94	Media	6742,62	37,53
0,97	Baja	3547,32	19,74
1	Muy baja	2593,11	14,43



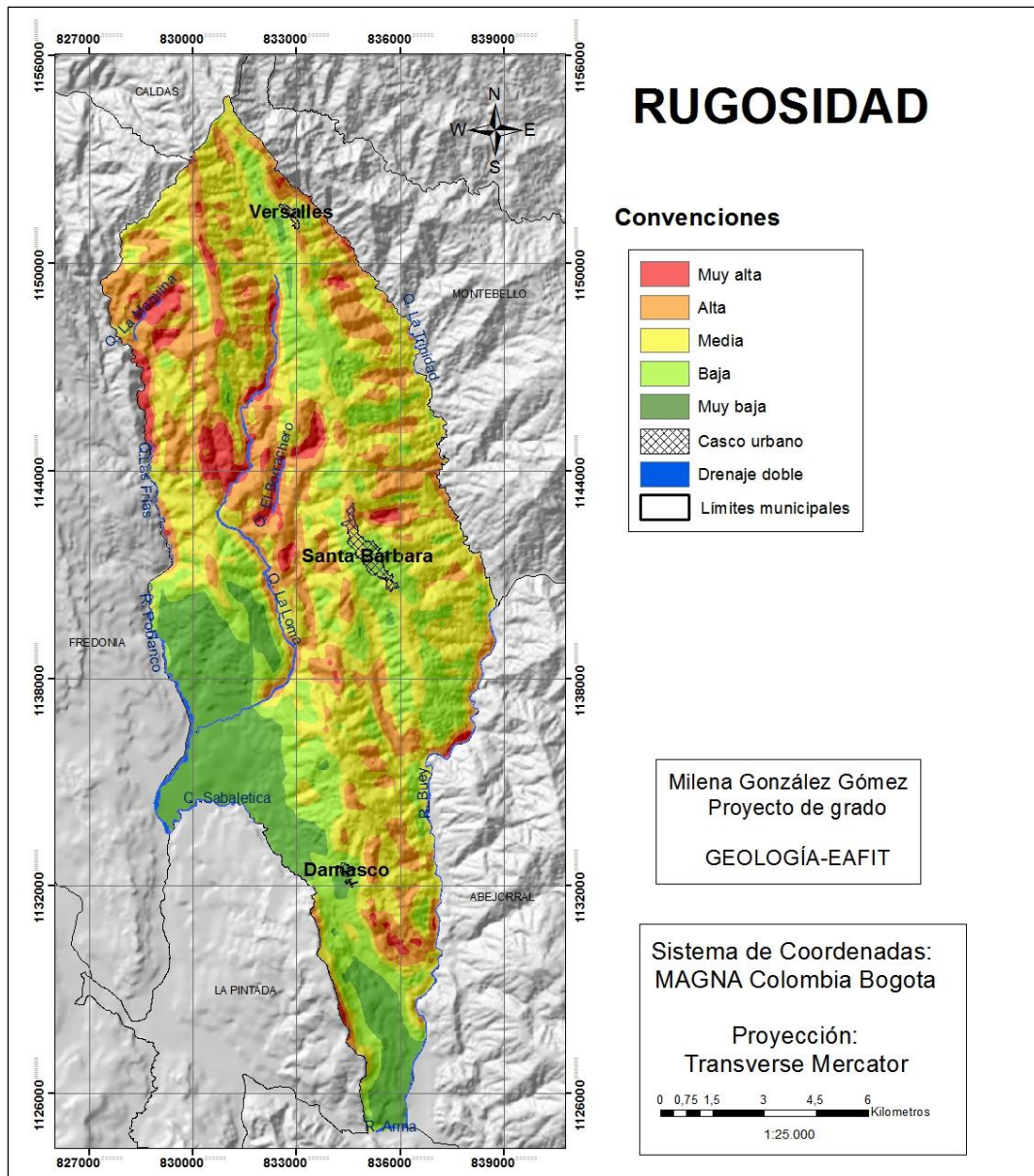


Figura 15. Mapa de rugosidad del municipio de Santa Bárbara, Antioquia.

#### 6.1.4 RELIEVE RELATIVO

El índice de relieve relativo se define como la diferencia entre la mayor elevación y la menor elevación por unidad de área y se expresa como la máxima diferencia de altura del terreno por metros (SGC, 2013). Esta diferencia de altura se presenta con relación a un nivel base del terreno, midiendo su variación indiferente de su altura con respecto al nivel del mar. Esta variable está directamente relacionada con la resistencia de los materiales a nivel superficial, asociados a la recurrencia de eventos de inestabilidad en materiales más erosionados o en aquellos que por su resistencia desarrollan un relieve con intervalos de

altura extremadamente altos y pendientes escarpadas y abruptas (CORANTIOQUIA-EAFIT, 2015a).

Esta variable muestra para el municipio de Santa Bárbara el predominio de zonas con índice de relieve relativo moderado en el rango entre 100 a 150 metros, con un 39,27% del total del área, estos valores se encuentran distribuidos a lo largo de todo el municipio, exceptuando las zonas entre el río Poblano y la quebrada Sabaleticas; y la zona entre el río Buey y el río Arma, al sur del municipio.

De igual manera, se encuentra el relieve relativo muy bajo y bajo, con un marcado predominio, ocupando el 34,19% del total del área y ubicándose principalmente en las cimas, suroeste y sureste de Santa Bárbara.

Finalmente, las zonas con un índice de relieve relativo alto, muy alto y extremadamente alto suman un 26,54% del total del área de estudio, estos intervalos se localizan a lo largo de todo el municipio, con una ubicación específica del índice extremadamente alto, al sur del casco urbano de Damasco, en el escarpe de cerro Amarillo.

En la siguiente tabla se encuentra la descripción para la clasificación que se utilizó en el mapa de relieve relativo (Figura 16).

Tabla 5. Descripción del atributo Relieve relativo.

<b>INTERVALOS DE ALTURA</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL RELIEVE</b>	<b>TOTAL ÁREA (ha)</b>	<b>PORCENTAJE (%)</b>
0-50	Muy bajo	2332,17	12,22
50-100	Bajo	4194,62	21,97
100-150	Moderado	7495,93	39,27
150-200	Alto	4460,07	23,37
200-300	Muy alto	567,20	2,97
>300	Extremadamente alto	38,63	0,20

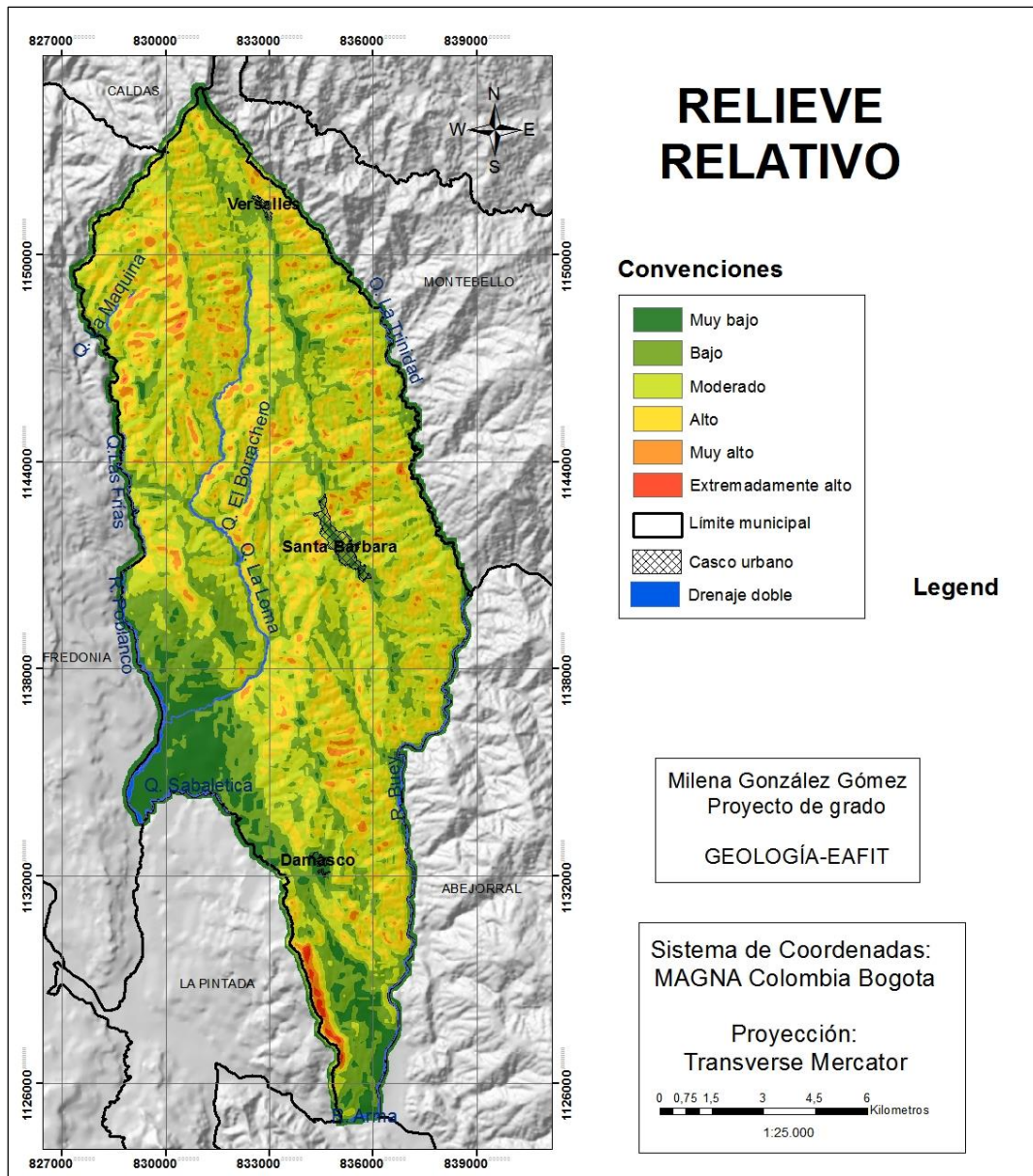


Figura 16. Mapa de relieve relativo del municipio de Santa Bárbara, Antioquia.

## 6.2 GEOLOGÍA LOCAL

En el municipio de Santa Bárbara, afloran una secuencia de rocas, variables en edad entre Paleozoico hasta Cuaternario, las cuales se describen a continuación en orden cronológico de la más antigua a la más reciente (Figura 17). Para la identificación de estas unidades se tomaron en cuenta trabajos anteriores, realizados en la zona de estudio, en materias como rocas sedimentarias, estratigrafía y/o campo II de la Universidad EAFIT.



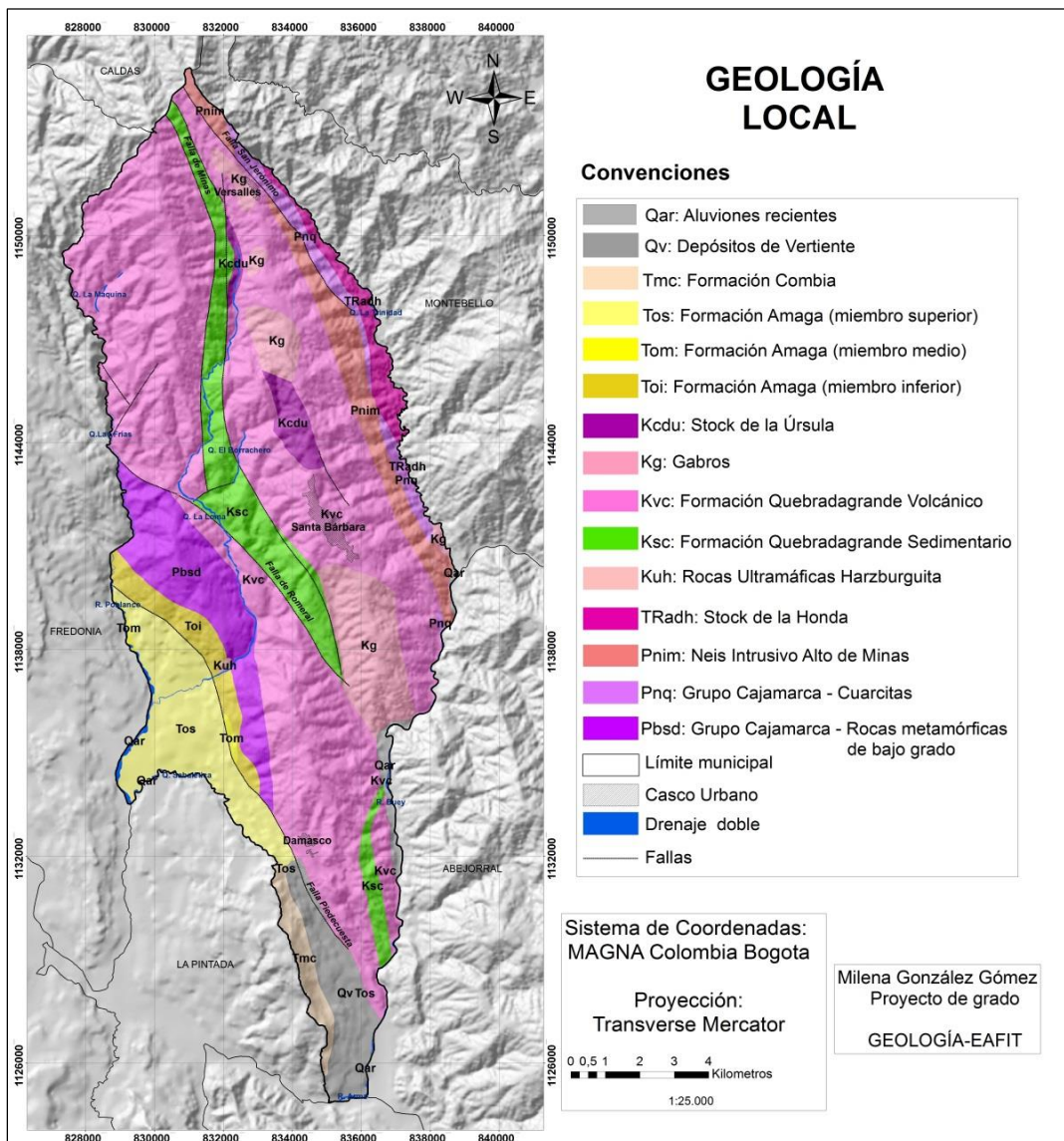


Figura 17. Geología local del municipio de Santa Bárbara, Antioquia. Modificado de las planchas 166 Jericó y 167 Sonsón (INGEOMINAS, 1980b y 1980c).

## 6.2.1 UNIDADES LITOLÓGICAS

### Paleozoico

#### 6.2.1.1 Grupo Cajamarca: Rocas metamórficas de bajo grado (Pbsd):

Esta unidad está localizada en una franja al oeste de la zona de estudio en sentido NW-SE, en la vereda Poblano. Está compuesta por rocas de muy bajo grado de metamorfismo que conservan la textura clástica del sedimento original, como metalimolitas, metalodolitas,



metareniscas y por areniscas y grauvacas en las cuales no se aprecian rasgos de textura metamórfica posiblemente por su composición mineralógica y el bajo grado de metamorfismo. (INGEOMINAS, 1978 y 1980a). En campo se observó en algunas zonas como saprolito, la roca se decoloró y transformó en suelo; sin embargo aún conserva la textura original metamórfica foliada o se encuentra como metasedimentos foliados con bloques embebidos de areniscas.

Esta unidad aflora en la carretera hacia Damasco, se observan esquistos, con planos de foliación EW/50°N, presencia en algunos sectores de venas de cuarzo, además se observaron bloques de cuarcitas mucho más resistentes respecto a la competencia de los metasedimentos (Figura 18).



Figura 18. Metasedimentos foliados del Grupo Cajamarca, con bloques embebidos de areniscas, corregimiento de Damasco.

#### **6.2.1.2 Grupo Cajamarca - Cuarcitas (Pnq):**

Localizadas en una franja estrecha y alargada al noreste del área de estudio. Se encuentran asociadas al trazo de la falla San Jerónimo. Son cuarcitas biotítico-feldespáticas con transiciones a esquistos y neis cuarzofeldespáticos (Figura 19). (INGEOMINAS, 1978 y 1980a). La roca se encontraba moderadamente descompuesta, decolorada, meteorizada en algunos sectores, pero la estructura y la fábrica se conservan.



Figura 19. Muestra de mano de las cuarcitas biotítico-feldespáticas. Carretera Santa Bárbara – Montebello.

#### **6.2.1.3 Neis Intrusivo Alto de Minas (Pnim):**

Se presenta en forma de franja alargada, afloran en el noreste del municipio de Santa Bárbara. Está compuesta por granodiorita néisica con moscovita y localmente con biotita (INGEOMINAS, 1978 y 1980a). La roca esta meteorizada dando un suelo arenoso arcilloso, de color crema con abundantes granos de cuarzo, en algunos sectores se encontraba roca y en otros más descompuesta a suelo, el afloramiento se encontraba totalmente decolorado y afectado por el trazo de la Falla San Jerónimo (Figura 20).



Figura 20. Neis Intrusivo Alto de Minas asociado al trazo de la Falla de San Jerónimo. Carretera Santa Bárbara –Montebello.

### Triásico

#### 6.2.1.4 Stock de la Honda (TRadh):

Este cuerpo alargado está ubicado al noreste del municipio de Santa Bárbara, en el límite con el municipio de Montebello, está compuesto principalmente por granodiorita con algunas zonas de cuarzomonzonita y pegmatita, de grano medio a grueso, maciza y equigranular. En campo se observaron pegmatitas con cuarzo, feldespato, moscovita, granates y turmalina negra (chorlo), las cuales conservan la estructura y fábrica original (Figura 21) (INGEOMINAS, 1978 y 1980a).





Figura 21. Muestra de mano de pegmatita del Stock de la Honda. Carretera Santa Bárbara – Montebello.

## Cretácico

### 6.2.1.5 Rocas Ultramáficas Harzburgita (Kuh):

Esta unidad aflora en la vereda Poblano, sobre la quebrada La Loma. Es un cuerpo de harzburgita emplazado dentro de sedimentos cuaternarios, con dimensiones menos a 1 km<sup>2</sup> (INGEOMINAS, 1978 y 1980a).

### 6.2.1.6 Formación Quebradagrande Miembro Sedimentario (Ksc):

El miembro sedimentario de la Formación Quebradagrande aflora en el centro y sureste del área de estudio, como franjas alargadas, en sentido N-NW. Sus mejores afloramientos se presentan en la quebrada La Loma y sobre la carretera Santa Bárbara – Fredonia. Está compuesto por pizarras arcillosas y silíceas, grauvacas de grano fino, limolitas y chert; localmente con intercalaciones de rocas volcánicas espilitizadas, en su mayor parte muestran efectos de metamorfismo dinámico con lentes y venas de cuarzo paralelas a la estratificación y bancos de chert (INGEOMINAS, 1978 y 1980a). Estas rocas se encuentran altamente meteorizadas y foliadas (EW/30°S) (Figura 22).



Figura 22. Cherts del miembro sedimentario, Formación Quebradagrande. Este afloramiento se encuentra ubicado en la quebrada El Chocho (vereda El Helechal).

#### **6.2.1.7 Formación Quebradagrande Miembro Volcánico (Kvc):**

El miembro volcánico de la Formación Quebradagrande, ocupa en forma general la mayor área en el municipio de Santa Bárbara, se presenta en el costado noroeste del municipio, siguiendo una dirección SE- NW. Esta unidad se asocia tectónicamente al Sistema de Falla de Romeral; los mejores afloramientos se presentan en las quebradas Las Frías y La Máquina. Litológicamente está compuesto por rocas verdes, como espilitas, diabasas, basaltos y rocas piroclásticas con intercalaciones del miembro sedimentario de la misma formación (INGEOMINAS, 1978 y 1980a) (Figura 23).

Para algunos autores (Toussaint y Restrepo, 1976), éste miembro es la parte volcánica de las ofiolitas colombianas y para otros (González, 1980) hace parte de un arco de isla acrecionado al continente (INGEOMINAS, 1980a).

Estas rocas verdes que afloran en la cabecera del municipio, se encuentran completamente saprolitizadas, de textura arcillosa y color predominantemente rojo.



Figura 23. Basaltos del miembro volcánico, Formación Quebradagrande. Este afloramiento se encuentra ubicado en la quebrada El Chocho (vereda El Helechal).

#### **6.2.1.8 Gabros (Kg):**

Estos cuerpos se encuentran distribuidos de manera general al noreste y este de la zona de estudio, siguiendo la traza de la falla de Minas. Están conformados por roca maciza de grano grueso hasta fino, compuesta por gabros de diálaga sausrinizados y uralitizados localmente foliados por efectos protoclasticos y/o cataclásticos. La cataclasis indica que su intrusión o emplazamiento fue anterior o contemporáneo con la tectónica que afectó el área. (INGEOMINAS, 1978 y 1980a).

Esta unidad aflora en el área urbana de Santa Bárbara, se encuentra completamente meteorizada y transformada en saprolito de color blanco y textura arcillosa. El gabro fresco presenta un color gris verdoso, de textura maciza y grano medio. El contacto entre los Gabros y la Formación Quebradagrande no se observa, se encontró una mezcla indistinta de estos tipos de rocas (Figura 24)





Figura 24. Afloramiento de gabro macizo y de color gris verdoso, ubicado en la carretera Troncal.

#### **6.2.1.9 Stock de la Úrsula (Kcdu):**

Este cuerpo pequeño de forma ovalada se localiza al norte del casco urbano de Santa Bárbara. Está compuesto por tonalita félsica variando a granodiorita, es una roca maciza fanerítica de grano medio, con abundante cuarzo, los afloramientos se encuentran en la carretera Versalles – Santa Bárbara, la roca está intensamente meteorizada, el saprolito residual conserva las características texturales de la roca original, en una masa arcillosa de color claro, producto de alteración de feldespatos, con manchas pardo-rojizas, relativamente escasas de óxidos de hierro, como producto de alteración de biotita – hornblenda (INGEOMINAS, 1978 y 1980a).

#### **Terciario**

#### **6.2.1.10 Formación Amaga:**

La Formación Amaga aflora al suroeste de la zona de estudio, en la margen derecha del río Poblano. Son sedimentos terciarios de ambiente continental que conforman un gran

depósito fluvio-lacustre (INGEOMINAS, 1978 y 1980). Se encuentra dividido en tres miembros:

-Toi: miembro inferior: conglomerados, areniscas conglomeráticas, areniscas cremas y grises, arcillolitas pizarrosas grises a gris verdosas. (INGEOMINAS, 1978 y 1980a).

-Tom: miembro medio: arcillas pizarrosas grises, areniscas claras y grises, localmente conglomeráticas, mantos de carbón hasta de 2 m de espesor (INGEOMINAS, 1978 y 1980a).

-Tos: miembro superior: las areniscas son gris azuladas a gris verdosas cuando están frescas, y gris amarillentas cuando están alteradas; tiene presencia de arcillolitas de color ocre. Presencia de areniscas abigarradas o con nódulos de limonita. Localmente presenta bancos delgados de conglomerados y de carbón (INGEOMINAS, 1978 y 1980a) (Figuras 25 y 26).



Figura 25. Afloramiento de la Formación Amagá, donde se observan areniscas, areniscas conglomeráticas, arcillolitas y carbón, quebrada La Pita, corregimiento de Damasco.





Figura 26. Bloques embebidos de una arenisca calcárea retrabajada en un estrato de arenisca gris verdosa, quebrada La Pita, corregimiento de Damasco.

#### **6.2.1.11 Formación Combia (Tmc):**

Esta unidad aflora en el sur del municipio de Santa Bárbara, cerca del corregimiento de Damasco. Se compone de estratos volcánicos y sedimentarios que pueden superponerse. El miembro volcánico se compone esencialmente de conglomerados con matriz tobácea, shales de color crema, areniscas tobáceas, tobas de cristales, tobas de cenizas, aglomerados, brechas volcánicas y derrames de basalto y andesitas. El miembro sedimentario son sedimentos compuesto por conglomerados, areniscas finas a medias y arcillolitas de color crema rojizo (INGEOMINAS, 1978 y 1980) (Figura 27).



Figura 27. Afloramiento de aglomerados de la Formación Combia ubicado en la quebrada La Pita, corregimiento de Damasco.

## **Cuaternario**

### **6.2.1.12 Depósitos de Vertiente (Qv):**

Se encuentran a sur de la zona de estudio, cerca al escarpe perteneciente al cerro Amarillo. Se forman por la acumulación en las laderas de las montañas provenientes de masas de roca y suelo deslizadas desde las partes altas. Están compuestas por bloques subangulares a subredondeados de rocas con diferentes grados de meteorización dispersos en una matriz de arena.

### **6.2.1.13 Aluviones recientes (Qar):**

Se localizan en cercanías de los ríos Poblano, Buey y Arma. Son formados a expensas de las aguas corrientes superficiales, bien estén encauzados o discurren libremente. Suelen ser constituidos por bancos de grava gruesa con intercalaciones de arena guijosa y limo. En algunos lugares los aluviones incluyen material coluvial producto del deslizamiento a través de las pendientes que bordean los caños o valles por donde transcurren las aguas

(INGEOMINAS, 1978 y 1980a). En campo se observaron los depósitos del río Poblano, los cuales tenían un espesor de aproximadamente 6 m (Figura 28).



Figura 28. Depósitos del río Poblano, vereda Poblano.

### 6.2.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL

El área comprendida entre las cordilleras Occidental y Central, es considerada geológicamente como una antigua zona de subducción; es una región tectónicamente compleja que se extiende desde el Ecuador hasta el Norte del territorio colombiano; en el país esta zona se encuentra enmarcada por la zona de la Falla Romeral (Botero et al, 1991).

La falla fundamental de Romeral, que define la zona, se extiende a través de Colombia por más de 800 km desde el departamento de Córdoba hasta el sur del departamento de Nariño (Barrero et al., 1969).

El marco estructural de Santa Bárbara es muy complejo, ya que el municipio está localizado entre la Falla de San Jerónimo al Este y la falla Piedecuesta al Oeste. De igual manera se encuentra asociado a la falla de Minas y la falla Romeral. También se observa algunos rasgos geomorfológicos que evidencian un control estructural de varios lineamientos paralelos y perpendiculares a éstas fallas. Por esta razón, las rocas se encuentran altamente foliadas, diaclasadas o cizalladas.

Con base en la posición de las fallas respecto a la cabecera municipal, éstas se agrupan en dos categorías:

#### -Flanco Oeste

Falla de Romeral: se encuentra localizada a 2 km aproximadamente de la cabecera del municipio, cuenta con una longitud aproximada de 24 km en el área de estudio y se encuentra asociada a algunas unidades de ambiente estructural, como cerros estructurales, gancho de flexión, laderas estructurales, entre otras.

Falla de Piedecuesta: localizada en el sector sur de la zona de estudio, tiene una longitud aproximada de 15 km en el municipio. Su trazo genera rasgos geomorfológicos como el escarpe de línea de falla, cerros estructurales, etc.

#### -Flanco Este

Falla del Alto de Minas: controla estructuralmente la quebrada La Loma, tiene una longitud aproximada de 11 km en el municipio y genera rasgos geomorfológicos como los espolones y laderas estructurales.

Falla de San Jerónimo: posee una dirección general Noroeste y su traza principal se manifiesta geomorfológicamente con el alineamiento e incisión profunda de la quebrada Sabaletas. Tiene una longitud aproximada de 16,5 km en el municipio.

### **6.3 GEOMORFOLOGÍA LOCAL**

El mapa geomorfológico del municipio, se elaboró por medio de la interpretación de sensores remotos y del trabajo de campo, en donde se pudo verificar las subunidades geomorfológicas definidas en la interpretación.

En la zona de estudio se encontraron tres ambientes geomorfológicos: estructural, caracterizado por encontrarse en mayor proporción, debido a los fuertes rasgos tectónicos de la zona; denudacional, conformados principalmente por unidades sedimentarias que han tenido altos procesos de erosión en la zona; y fluvial localizados principalmente sobre los ríos Poblano y Buey.

En la figura 29 se presenta el mapa de las subunidades geomorfológicas del municipio de Santa Bárbara, para la clasificación de estas subunidades, se utilizó el glosario del Servicio Geológico Colombiano, sin embargo se le dio más detalle al momento de describirlas, de acuerdo a la longitud, forma y pendiente; ya que éstas son a una escala 1:25.000. En este mapa se encuentran las subunidades pertenecientes al ambiente denudacional de color café, las subunidades del ambiente estructural de color morado y finalmente las subunidades que conforman el ambiente fluvial de color azul.



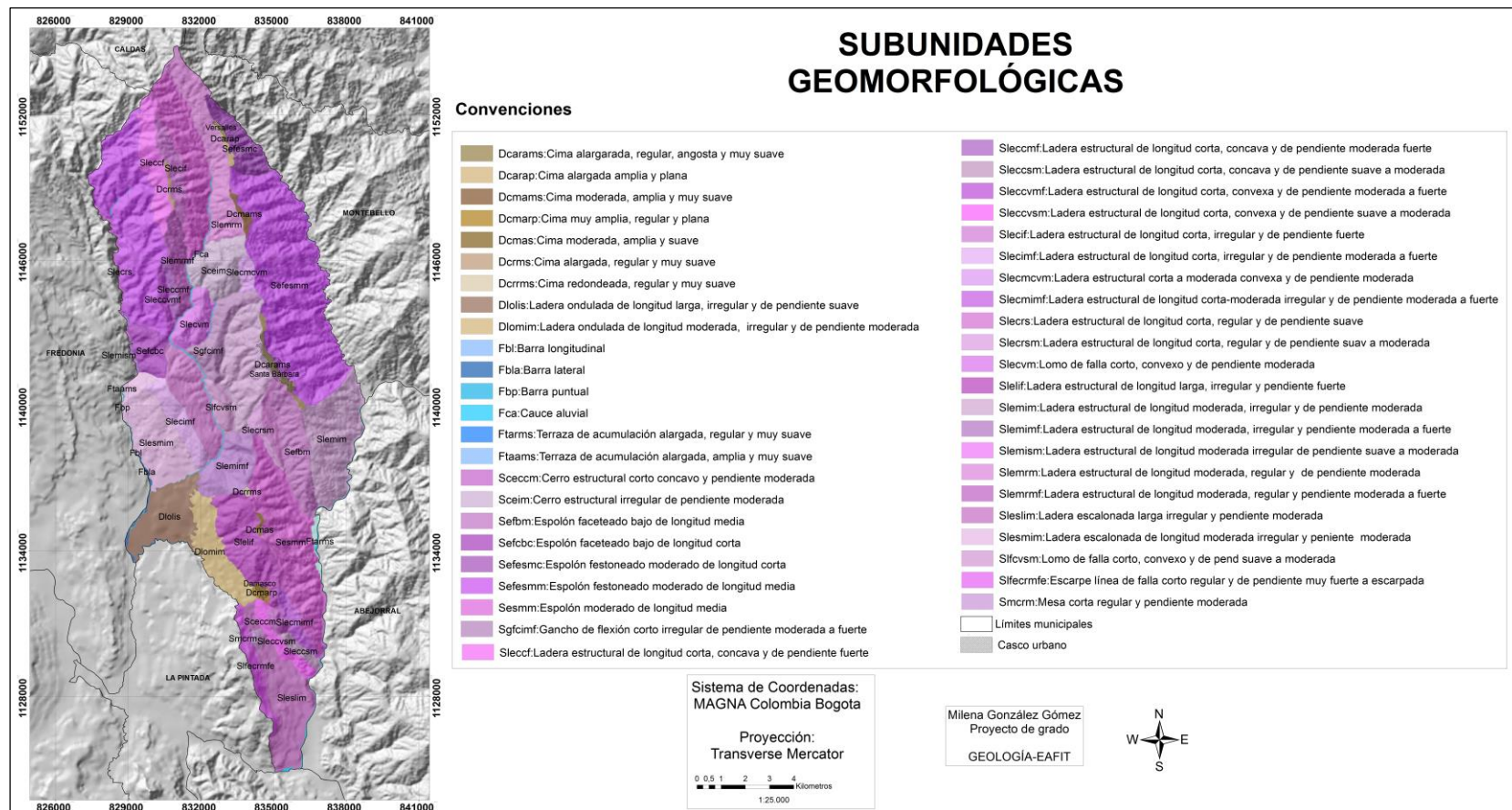


Figura 29. Mapa de las subunidades geomorfológicas del municipio de Santa Bárbara, Antioquia.

### 6.3.1 AMBIENTE DENUDACIONAL

Se incluyen las geoformas cuya expresión morfológica está definida por la acción combinada de procesos moderados a intensos de meteorización, erosión y transporte de origen gravitacional y pluvial que han remodelado y dejado remanentes de las geoformas preexistentes y además crean nuevas por acumulación de sedimentos (SGC, 2013). Estas subunidades están principalmente asociadas a las rocas sedimentarias presentes en el sur del área de estudio

**6.3.1.1 Cima (Dc):** superficie amplia convexa a plana, dispuesta en franjas alargadas que bordean algunas divisorias de agua. Presentan pendientes planas a inclinadas con anchos entre 200 a 600 metros, limitadas por laderas cuya inclinación puede ser moderada a fuerte. Su origen se establece a partir de procesos meteorización, erosión intensa y actividad antrópica (SGC, 2013).

En la mayoría de cimas cartografiables de la zona de estudio, se encuentran ubicados los cascos urbanos, tanto del municipio de Santa Bárbara, como sus corregimientos (Figura 30). Debido a que en el municipio se pudieron cartografiar un gran número de cimas, éstas se distinguieron según su longitud (corta, media o larga); forma (regular, irregular, cóncava, convexa) y pendiente (plana, muy suave, suave, moderada, fuerte, muy fuerte y escarpada), se definieron 7 subunidades que se describen a continuación.

**Cima alargada, regular, amplia y plana (Dcarap):** esta subunidad está localizada en el corregimiento de Versailles. No se encuentran movimientos en masa asociados a ésta y tiene una extensión de aproximadamente 2 km (Figura 30).



Figura 30. Subunidad de cima alargada, regular, amplia y plana, corregimiento de Versailles.

**Cima alargada, regular y muy suave (Dcrms):** se localiza al noroeste del municipio de Santa Bárbara, y presenta un proceso subtipo deslizamiento traslacional. Esta subunidad pertenece litológicamente al miembro volcánico de la Formación Quebradagrande (Figura 31).

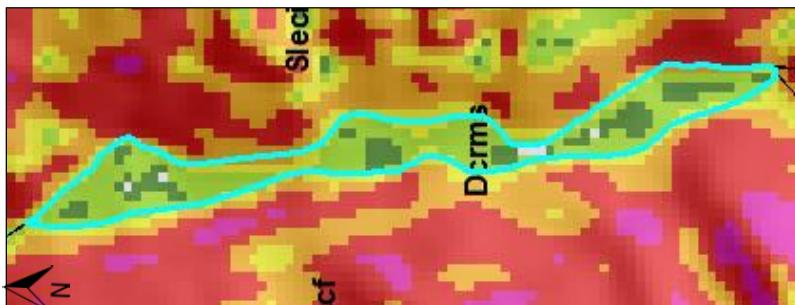


Figura 31. Modelo de sombras donde se delimita la subunidad de cima alargada, regular y muy suave.

**Cima alargada, regular, angosta y muy suave (Dcarams):** en esta subunidad se ubica la cabecera urbana del municipio, cuenta con una extensión de aproximadamente 4,5 km y se encuentra afectada en un sector por un deslizamiento subtipo rotacional, el cual es activo (Figura 32).

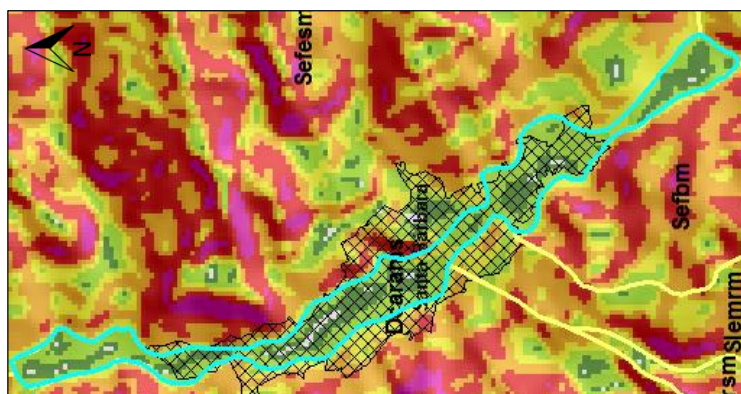


Figura 32. Modelo de sombras donde se delimita la subunidad de cima alargada, regular, angosta y muy suave.

**Cima moderada, amplia y muy suave (Dcmams):** la subunidad de cima amplia redondeada se localiza al sur del corregimiento de Versalles, entre las veredas Quebra del Barro, Ojo de Agua y El Guayabo. Asociado a esta subunidad se encuentra un proceso subtipo deslizamiento traslacional (Figura 33).



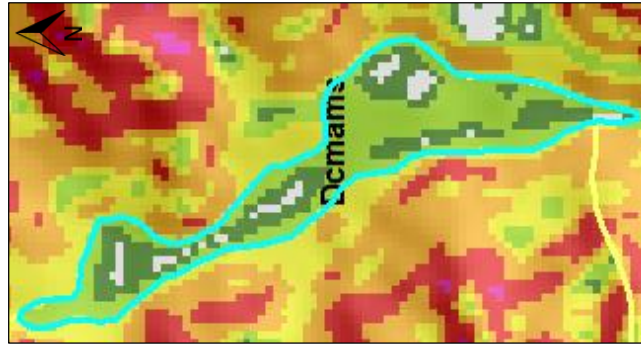


Figura 33. Modelo de sombras donde se delimita la subunidad de cima moderada, amplia y muy suave.

**Cima moderada a corta, amplia y suave (Dcmas):** esta subunidad se encuentra ubicada en la vereda El Cordoncillo, no presenta asociado procesos gravitacionales; sin embargo si hay presencia de procesos erosivos como terracetas (Figura 34).



Figura 34. Modelo de sombras donde se delimita la subunidad de cima moderada a corta, amplia y suave.

**Cima muy amplia, regular y plana (Dcmarp):** en esta subunidad se localiza el casco urbano del corregimiento de Damasco, no se encuentran asociados a ésta movimientos en masa ni procesos erosivos (Figura 35).

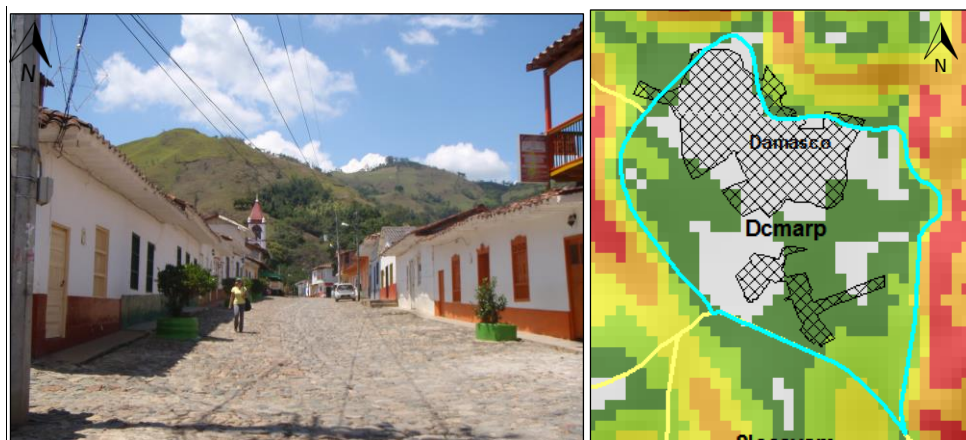


Figura 35. Modelo de sombras donde se delimita la subunidad de cima muy amplia, regular y plana.



**Cima redondeada, regular y muy suave (Dcrrms):** esta subunidad se ubica en la vereda Cordoncillo y no presenta movimientos en masa, sin embargo si se observa un poco de sobrepastoreo (Figura 36).



Figura 36. Modelo de sombras donde se delimita la subunidad de cima redondeada, regular y muy suave.

**6.3.1.2 Ladera ondulada (Dlo):** superficie en declive de morfología alomada, pendientes suaves a abruptas, y longitudes cortas a largas. La forma de las laderas es predominantemente de aspecto irregular en sentido trasversal a la pendiente. El patrón de drenaje es subdendrítico a subparelo. Estas laderas se pueden formar sobre suelos residuales y depósitos coluviales (SGC, 2013). De acuerdo con su longitud (corta, media o larga); forma (regular, irregular, cóncava, convexa) y pendiente (plana, muy suave, suave, moderada, fuerte, muy fuerte y escarpada) se han definido 2 subunidades que se describen a continuación.

**Ladera ondulada larga, irregular y suave (Dlolis):** esta geoforma se localiza al suroeste del municipio de Santa Bárbara, limitando con el río Poblano. Se observan pocos deslizamientos traslacionales cerca de la quebrada La Loma y también algunos procesos erosivos producto del sobrepastoreo, como terracetas. Esta subunidad se encuentra incisada por los afluentes que se dirigen al Río Poblano. Hace parte de La Formación Amagá (Tos) y también de los Depósitos de Aluviones Recientes (Qar) (Figura 37).

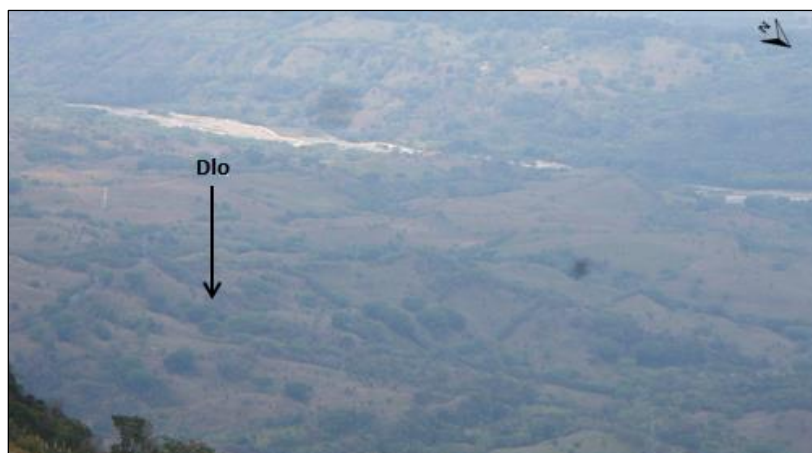


Figura 37. Subunidad de ladera ondulada larga, irregular y suave ubicada cerca al río Poblano.

**Ladera ondulada media, irregular y moderada (Dlomim):** se identificó esta ladera ondulada en el sur del Municipio, cerca al casco urbano de Damasco. Esta subunidad presenta pequeños deslizamientos traslacionales y algunos procesos erosivos como terracetas. Litológicamente hace parte de La Formación Amagá (Figura 38).



Figura 38. Subunidad de ladera ondulada media, irregular y moderada.

### 6.3.2 AMBIENTE ESTRUCTURAL

Incluye las geoformas que se originan por procesos relacionados con la dinámica interna de la tierra, asociados principalmente al plegamiento y el fallamiento de las rocas, cuya expresión morfológica es definida por la tendencia y la variación en la resistencia de las subunidades (SGC, 2013).

En la zona de estudio hay un fuerte control estructural, debido a las características tectónicas de la región, las fallas tanto regionales como locales y algunos lineamientos importantes, imprimen un carácter estructural significativo.

**6.3.2.1 Cerro estructural (Sce):** prominencia topográfica aislada de morfología colinada, con laderas de longitud corta a medias, cóncavas a irregulares, poco disectadas. La subunidad presenta pendientes muy fuertes, las cuales han sido parcialmente aisladas de las zonas montañosas por fallamiento (SGC, 2013). De acuerdo con su longitud (corta, media o larga); forma (regular, irregular, cóncava, convexa) y pendiente (plana, muy suave, suave, moderada, fuerte, muy fuerte y escarpada) se han definido 2 subunidades que se describen a continuación:

**Cerro estructural corto, cóncavo y moderado (Sceccm):** esta subunidad se encuentra al sureste del casco urbano de Damasco, asociado al trazo de la falla Piedecuesta. Se caracteriza por presentar pendientes moderadas a fuertes, procesos de erosión como terracetas y gravitacionales de subtipo deslizamientos traslacionales (Figura 39).

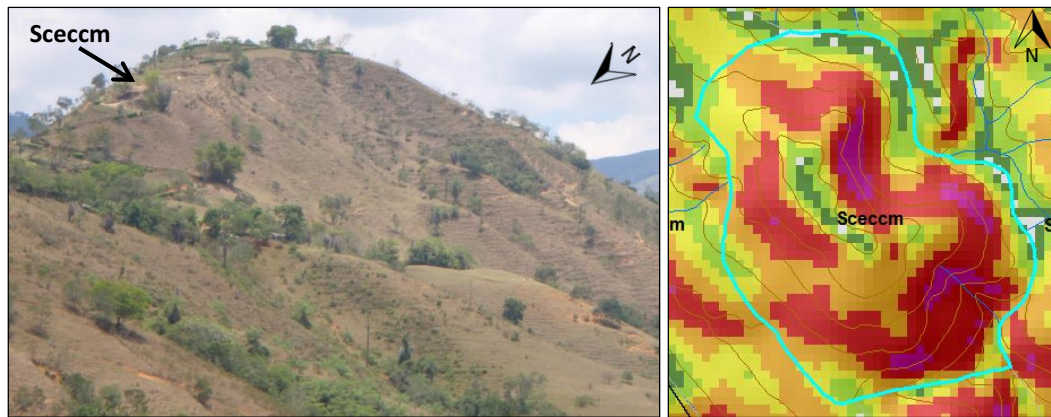


Figura 39. Subunidad y modelo de pendientes donde se observa el cerro estructural corto, cóncavo y moderado.

**Cerro estructural medio, irregular y moderado (Scemim):** esta geoforma se encuentra localizada en la vereda Alto de Los Gómez, al noroeste de la cabecera urbana del municipio, asociada al trazo de la falla de Minas. Se encuentra asociada a un gran número de procesos tipo deslizamientos traslacionales y algunas zonas presentan procesos erosivos (Figura 40).

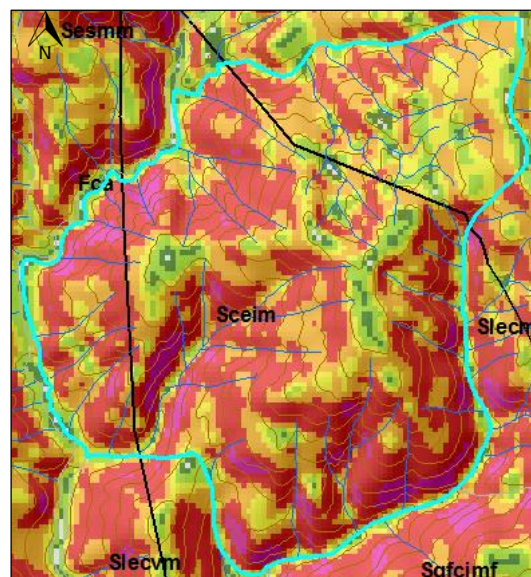


Figura 40. Modelo de pendientes con la delimitación de la subunidad cerro estructural irregular y moderado.

**6.3.2.2 Escarpe línea de falla (Slfe):** plano vertical a subvertical corto a muy corto, cóncavo a convexo de pendiente escarpada. Su origen se relaciona a las superficies definidas por el truncamiento de estructuras topográficas y geológicas afectadas por procesos de erosión acentuada (SGC, 2013).

**Escarpe línea de falla corto, regular y muy fuerte a escarpado (Slfecrmfe):** esta subunidad se encuentra localizada al sureste del municipio de Santa Bárbara, asociada al trazo de la falla Piedecuesta, en límites con el municipio de La Pintada, pertenece al cerro Amarillo, por lo tanto está compuesta por la Formación Combia (Tmc). Presenta un proceso de deslizamiento subtipo traslacional y no se observaron procesos erosivos. (Figura 41).

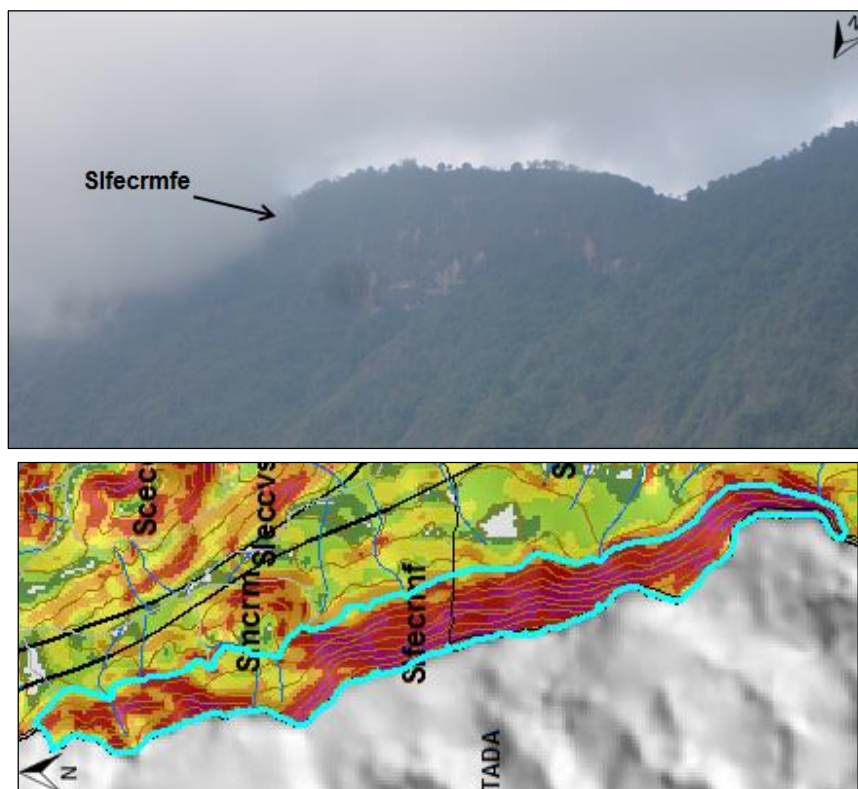


Figura 41. Subunidad y modelo de pendientes del escarpe de línea de falla corto, regular y muy fuerte a escarpado. Damasco - Cerro Amarillo.

**6.3.2.3 Espolón faceteado (Sefc):** saliente natural que en conjunto conforma sierras colinadas que se desprenden de estructuras mayores las cuales corresponden a procesos de plegamiento, fallamiento y erosión diferencial sobre rocas de distinta competencia. Es producto de fallamiento inverso y de rumbo que generan truncamientos a manera de facetas triangulares (SGC, 2013).

**Espolón faceteado bajo de longitud corta (Sefcbc):** la particularidad de esta subunidad radica en que el relieve relativo es menor de 250 m y la longitud del eje principal del espolón es menor que 250 m, se encuentra localizada en la vereda Poblano, asociado al trazo de un lineamiento de dirección NS, su longitud es corta, es irregular, tiene pendiente moderada a fuerte y presenta movimientos en masa de tipo deslizamientos traslacionales y flujos de tierra (Figura 42).



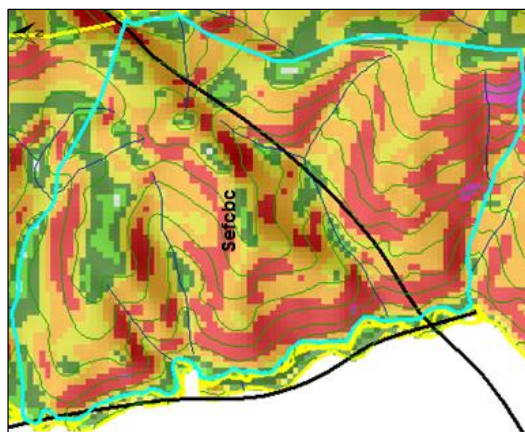


Figura 42. Modelo de pendientes donde se delimita la subunidad espolón faceteado bajo de longitud corta

**Espolón faceteado bajo de longitud media (Sefcbm):** estos espolones tienen el relieve relativo menor de 250 m y la longitud del eje principal del espolón varía entre 250 m y 1000 m; el patrón de drenaje es paralelo, están asociados al trazo de la falla Romeral y su pendiente es fuerte. Se localizan al suroeste del casco urbano de Santa Bárbara y se pueden observar algunos deslizamientos traslacionales y en menor medida deslizamientos rotacionales (Figura 43).



Figura 43. Espolón faceteado bajo de longitud media.

**6.3.2.4 Espolón festoneado (Sefes):** laderas y crestas simétricas de morfología alomada, cimas agudas dispuestas perpendicularmente al rumbo de las estructuras geológicas y que definen salientes cortas y largas, sobre rocas de distinto origen. Las pendientes varían entre muy inclinadas a muy abruptas con formas rectas y cóncavas. Entre los

entallamientos eventualmente se generan pequeños movimientos de tierras y flujos donde los suelos se encuentran saturados (SGC, 2013).

**Espolón festoneado moderado de longitud corta (Sefesmc):** la particularidad de esta subunidad radica en que el relieve relativo varía entre 250 m y 1000 m y la longitud del eje principal del espolón es menor que 250 m; el patrón de drenaje es subparalelo y están asociados con la traza de la falla de San Jerónimo, esta subunidad se localiza al este y sureste del casco urbano de Versalles y presenta algunos deslizamientos tanto traslacionales como rotacionales (Figura 44).

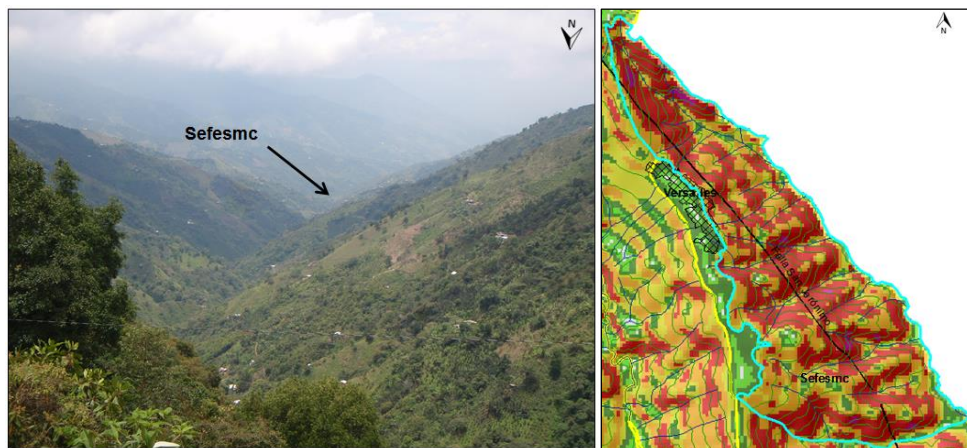


Figura 44. Subunidad y modelo de pendientes con la delimitación del espolón festoneado moderado de longitud corta.

**Espolón festoneado moderado de longitud media (Sefesmm):** la particularidad de esta subunidad radica en que el relieve relativo varía entre 250 m y 1000 m y la longitud del eje principal del espolón varía entre 250 m y 1000 m, se encuentra ubicada al este y noreste del casco urbano de Santa Bárbara, la pendiente de sus laderas son fuertes a muy fuertes, el patrón de drenaje es subparalelo y están asociados con la traza de la falla de San Jerónimo (Figura 45). Se presentan en esta subunidad algunos movimientos en masa de subtipo deslizamientos traslacionales.

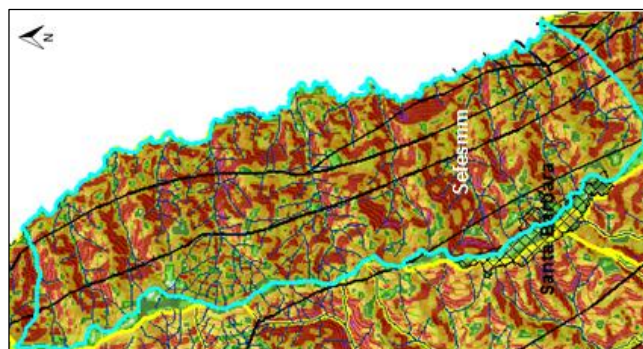


Figura 45. Modelo de pendientes con la delimitación de la subunidad espolón festoneado moderado de longitud media.

Esta geoforma también se encontró al noroeste de Santa Bárbara, en límites con el municipio de Fredonia, esta subunidad se encuentra asociada a la traza de la falla Romeral, así como a lineamientos importantes; se observaron movimientos en masa significativos tipo deslizamientos traslacionales y flujos de tierras, principalmente en la vereda La Arcadia (Figura 46).

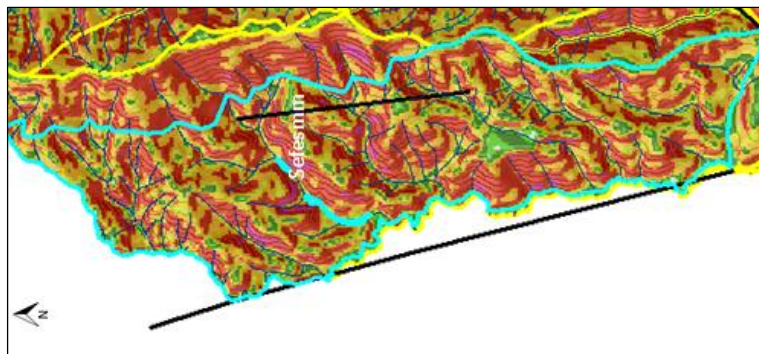


Figura 46. Modelo de pendientes con la delimitación de la subunidad espolón festoneado moderado de longitud media.

**6.3.2.5 Espolón (Ses):** saliente de morfología alomada, dispuesta perpendicularmente a la tendencia estructural general de la región, desarrollados sobre rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias. Con laderas de longitudes variables, con pendientes que se ven reducidas de abruptas a inclinadas por intensos procesos denudativos (SGC, 2013).

**Espolón moderado de longitud media (Sesmm):** estos espolones tienen el índice de relieve relativo entre 250 m y 1000 m y la longitud del eje principal del espolón está entre 250 m y 1000 m; el patrón de drenaje es subparalelo, y están asociados a la traza de la falla Romeral; se encuentran localizados al suroeste del casco urbano de Santa Bárbara y presenta importantes movimientos en masa subtipo deslizamientos traslacionales y algunos flujos de tierra (Figura 47).



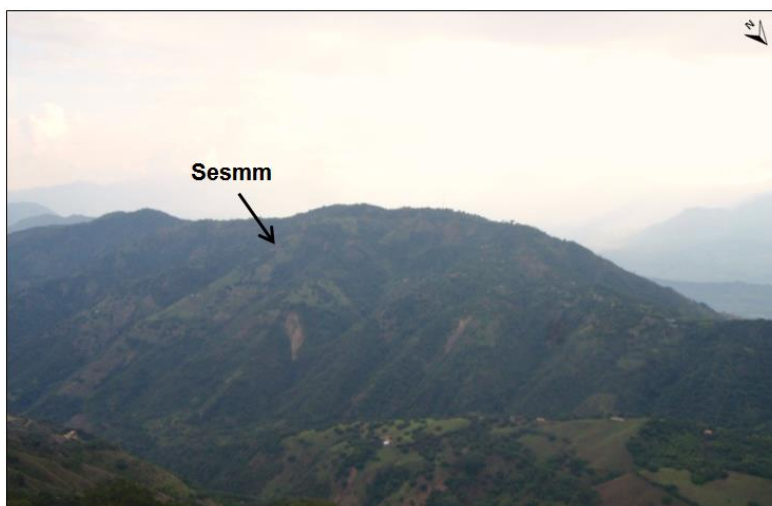


Figura 47. Espolón moderado de longitud media.

Esta subunidad también se identificó y se delimito al norte del municipio de Santa Bárbara, en el sector oeste del casco urbano del corregimiento de Versalles. Se encuentra asociada al trazo de la falla de Minas y se caracteriza por tener un número importante de deslizamientos de subtipo traslacionales y algunos flujos de tierras (Figura 48).

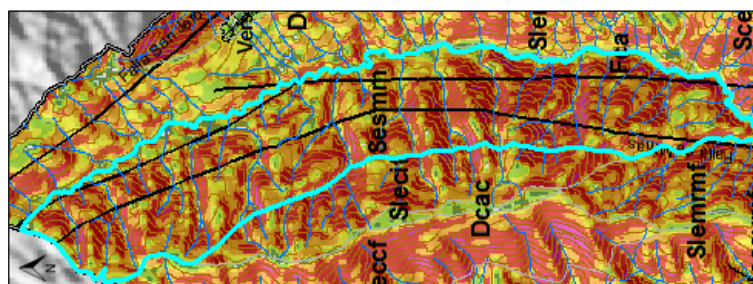


Figura 48. Modelo de pendientes con la delimitación de la subunidad espolón moderado de longitud media.

**6.3.2.6 Gancho de flexión (Sgf):** espolón estructural de morfología alomada, con una geometría en planta en forma de gancho. Su origen se relaciona al efecto combinado generado por el desplazamiento lateral a lo largo de una falla de rumbo y su posterior incisión erosiva (SGC, 2013).

**Gancho de flexión corto, irregular y de moderado a fuerte (Sgfcimf):** esta subunidad se encuentra asociada al trazo de la falla Romeral, presenta una cima subredondeada y continua, con pendientes moderadas a fuertes, laderas de longitud corta a moderada e irregulares, el patrón de drenaje es subparalelo. Se localiza al noroeste del casco urbano de Santa Bárbara, sobre la margen derecha de la quebrada La Loma y presenta algunos deslizamientos traslacionales (Figura 49).



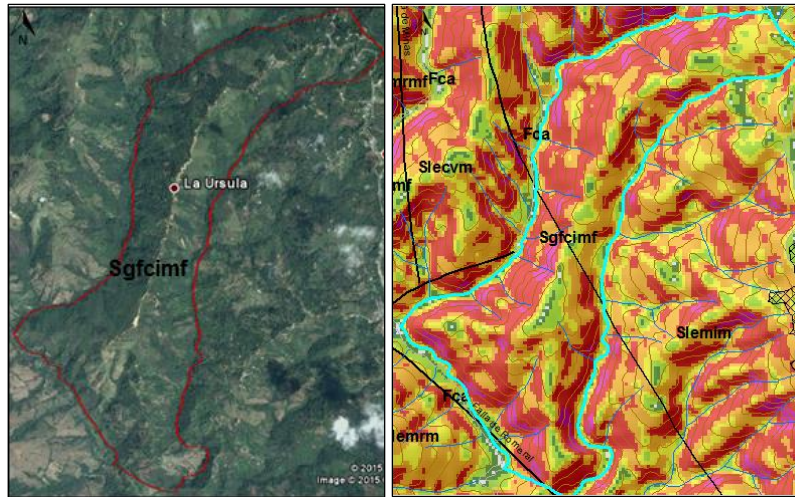


Figura 49. Imagen tomada de Google Earth y modelo de sombras con la delimitación de la subunidad gancho de flexión corto, irregular y moderado a fuerte.

**6.3.2.7 Ladera escalonada (Sles):** superficie definida por estratos dispuestos a favor o en contra de la pendiente del terreno con forma recta, irregular a escalonada, longitud larga a extremadamente larga y pendiente muy inclinada a escarpada. Estas superficies se presentan separadas por escarpes abruptos de menor longitud. Su origen se relaciona a la incisión de los drenajes o al fracturamiento perpendicular al buzamiento o foliación, en unidades litológicas (SGC, 2013). De acuerdo con su longitud (corta, media o larga); forma (regular, irregular, cóncava, convexa) y pendiente (plana, muy suave, suave, moderada, fuerte, muy fuerte y escarpada) se han definido 2 subunidades que se describen a continuación:

**Ladera escalonada media, irregular y moderada (Slesmim):** esta subunidad se encuentra en la vereda Poblano, en la margen derecha del río Poblano, asociada a la falla Piedecuesta (Figura 50). Caracterizada por presentar un gran número de deslizamientos traslacionales, algunos deslizamientos rotacionales y procesos erosivos.



Figura 50. Ladera escalonada media, irregular y moderada.

**Ladera escalonada larga, irregular y moderada (Sleslim):** esta subunidad se localiza al sur de la zona de estudio, cerca al corregimiento de Damasco, asociada a la falla Piedecuesta. Se caracteriza por su longitud por ser ondulada perpendicular y paralela la pendiente y por tener incisión y pendientes moderadas. Se encuentra sobre Depósitos de Vertiente y presenta algunos deslizamientos traslacionales y procesos erosivos como terracetas. (Figura 51).



Figura 51. Ladera escalonada larga irregular y moderada.

**6.3.2.8 Ladera estructural (Sle):** superficie en declive, de morfología regular a irregular, definida por la tendencia tectónica y el control estructural. De corta a larga y con

pendientes moderadas a fuertes. Esta geoforma no está asociada a ninguna estructura de tipo regional (anticlinal, sinclinal, monoclinal, entre otros) (SGC, 2013).

La zona de estudio se encuentra marcada por un fuerte control tectónico, por lo tanto muchas de las laderas fueron identificadas como laderas estructurales aunque su geología no correspondiera a rocas sedimentarias, cuyos estratos estuvieran inclinados a favor de la pendiente; sino a la tectónica, a la expresión de las fallas regionales, locales y los lineamientos. De acuerdo con su longitud (corta, media o larga); forma (regular, irregular, cóncava, convexa) y pendiente (plana, muy suave, suave, moderada, fuerte, muy fuerte y escarpada) se han definido 15 subunidades que se describen a continuación:

**Ladera estructural corta a media, convexa y moderada (Slecmcvvm):** esta subunidad se localiza al norte del casco urbano de Santa Bárbara y se encuentra asociada a un lineamiento dirección NS y a pocos deslizamientos traslacionales (Figura 52).

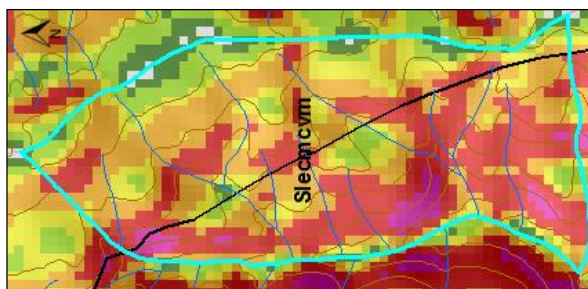


Figura 52. Modelo de sombras con la delimitación de la subunidad ladera estructural corta a media, convexa y moderada.

**Ladera estructural corta-media, irregular y moderada a fuerte (Slecmimf):** esta subunidad se encuentra localizada al sur del municipio, entre el corregimiento de Damasco y la vereda El Buey, asociada al trazo de la falla Piedecuesta, se caracteriza por presentar algunos deslizamientos traslacionales de áreas menores a 1600 m<sup>2</sup> (Figura 53).

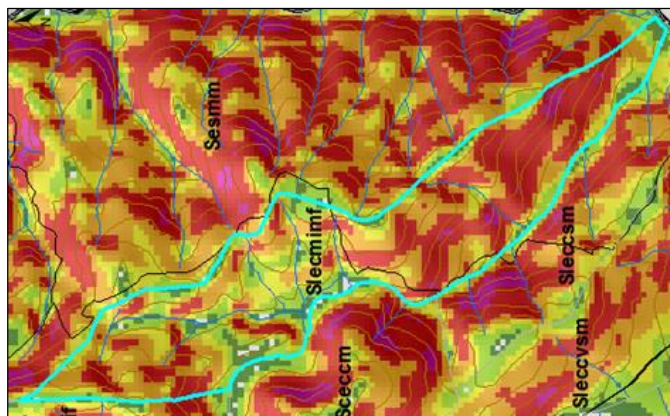


Figura 53. Modelo de sombras con la delimitación de la subunidad ladera estructural corta a media, irregular y moderada a fuerte.

**Ladera estructural corta, cóncava y fuerte (Sleccf):** se reconoció esta subunidad al noroeste de Santa Bárbara, asociada a la falla Romeral, esta ladera estructural se caracteriza por su pendiente fuerte y la presencia de algunos deslizamientos traslacionales (Figura 54).

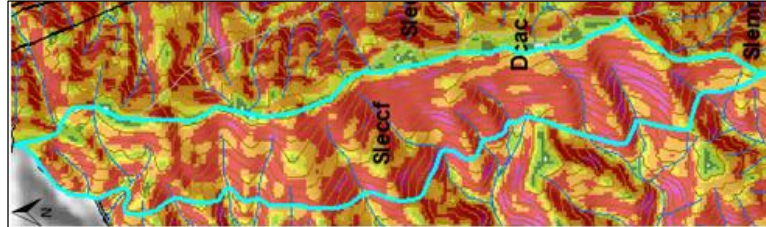


Figura 54. Modelo de sombras con la delimitación de la subunidad ladera estructural corta, cóncava y fuerte.

**Ladera estructural corta, cóncava y moderada a fuerte (Sleccmf):** esta subunidad se localiza en la vereda Las Mercedes, asociado al trazo de la falla de Minas y presenta muy baja distribución de deslizamientos subtipo traslacionales (Figura 55).

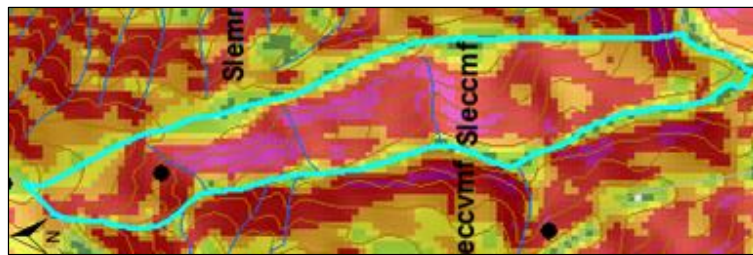


Figura 55. Modelo de sombras con la delimitación de la subunidad ladera estructural corta, cóncava y moderada a fuerte.

**Ladera estructural corta, cóncava y suave a moderada (Sleccsm):** esta geoforma se ubica al sureste del municipio de Santa Bárbara, asociada al trazo de la falla Piedecuesta, entre el corregimiento de Damasco y la vereda El Buey; no se encuentra asociada a movimientos en masa (Figura 56).



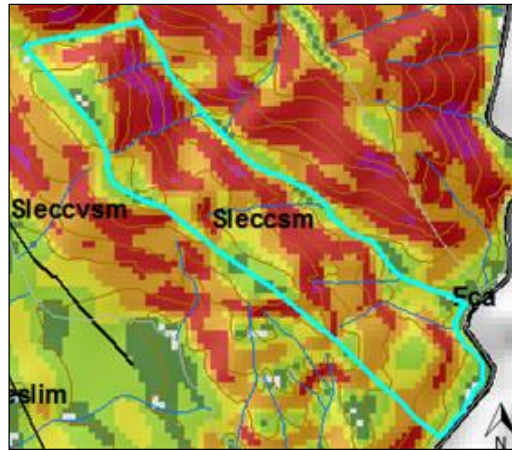


Figura 56. Modelo de sombras con la delimitación de la subunidad ladera estructural corta, cóncava y suave a moderada.

**Ladera estructural corta, convexa y moderada a fuerte (Sleccvmf):** esta ladera se localiza al oeste del municipio, entre la vereda Poblancó y Las Mercedes; asociada al trazo de la falla de Minas, solo se identificó un deslizamiento traslacional de área menor a 1600 m<sup>2</sup> (Figura 57).

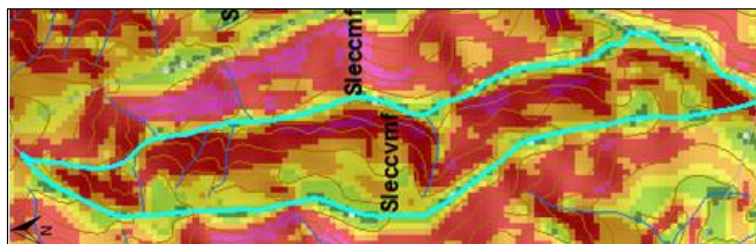
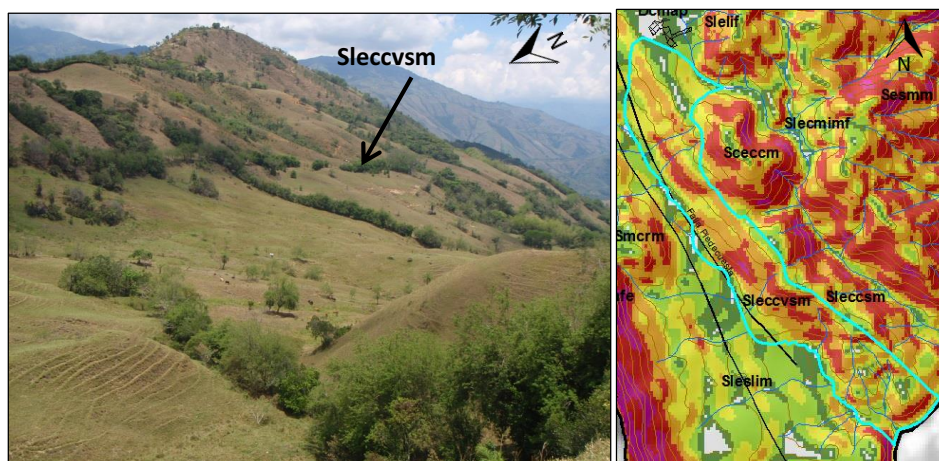


Figura 57. Modelo de sombras con la delimitación de la subunidad ladera estructural corta, convexa y moderada a fuerte.

**Ladera estructural corta, convexa y suave a moderada (Sleccvsm):** geoforma localizada al sur del municipio de Santa Bárbara, cerca al casco urbano del corregimiento de Damasco, asociada al trazo de la falla Piedecuesta, esta subunidad se caracteriza por presentar importantes de deslizamientos traslacionales (debido a que tienen áreas mayores a 1600 m<sup>2</sup>) y procesos erosivos como terracetas (Figura 58).



**Ladera estructural corta, irregular y fuerte (Slecif):** esta subunidad se localiza al oeste del corregimiento de Versailles, en la vereda Pitayo, asociada a la falla de Minas, presenta algunos deslizamientos de subtipo traslacionales, de áreas menores a 1600 m<sup>2</sup> (Figura 59).

**Ladera estructural corta, irregular y moderada a fuerte (Slecimf):** esta geoforma se localiza al oeste de la zona de estudio, en la vereda Poblano. Se caracteriza por su fuerte pendiente y por estar asociada al trazo de la falla Piedecuesta, por lo tanto se encuentra asociada a deslizamientos traslacionales (Figura 60).

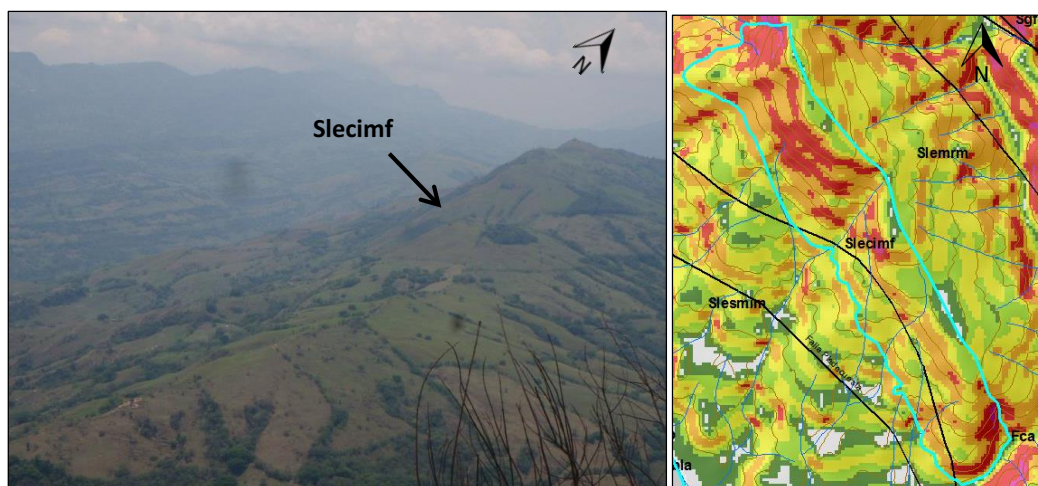


Figura 60. Subunidad y modelo de pendientes de ladera estructural corta, irregular y moderada a fuerte.

**Ladera estructural corta, regular y suave a moderada (Slecrsm):** esta geoforma se localiza al suroeste de la cabecera urbana del municipio, se encuentra asociada al trazo de la falla Romeral y presenta algunos deslizamientos en masa de áreas menores a 1600 m<sup>2</sup> (Figura 61).

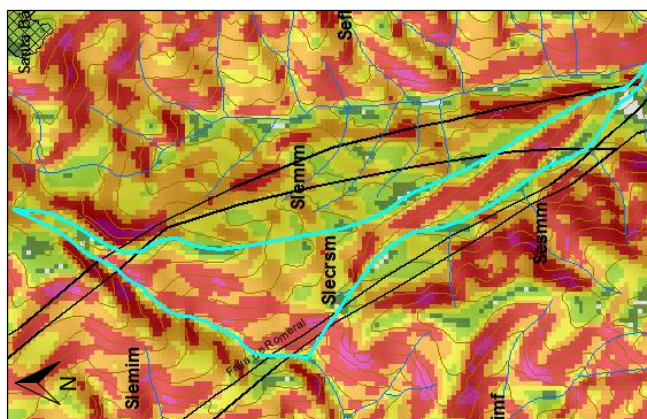


Figura 61. Modelo de pendientes donde se delimita la subunidad ladera estructural corta, regular y suave a moderada

**Ladera estructural larga, irregular y fuerte (Slelif):** esta subunidad se localiza al norte del casco urbano de Damasco como se puede observar en la figura 62, se encuentra asociada al trazo de la falla Piedecuesta, a algunos deslizamientos traslacionales y a procesos erosivos.







Esta geoforma se observó igualmente en la vereda Loma de Don Santos al sureste de la cabecera municipal, se encuentra asociada a la traza de la falla San Jerónimo y se pueden identificar algunos pequeños deslizamientos de subtipo traslacional (Figura 64).

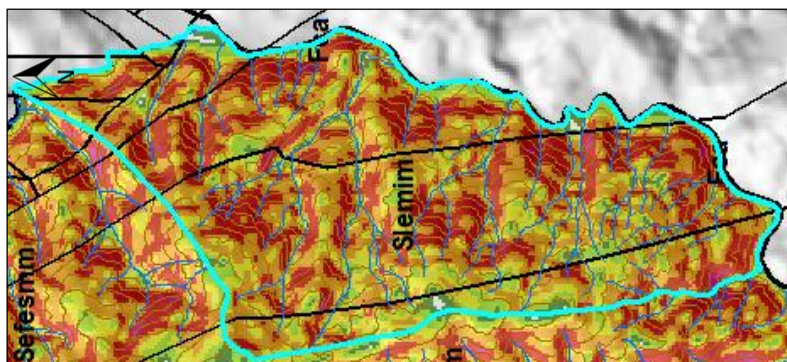


Figura 64. Modelo de pendientes donde se delimita la subunidad ladera estructural media, irregular y moderada.

**Ladera estructural media, irregular y moderada a fuerte (Slemimf):** esta subunidad se ubica al suroeste del casco urbano de Santa Bárbara y se encuentra asociada al trazo de lineamientos NE-SW y a la presencia de deslizamientos subtipo traslacionales (Figura 65).

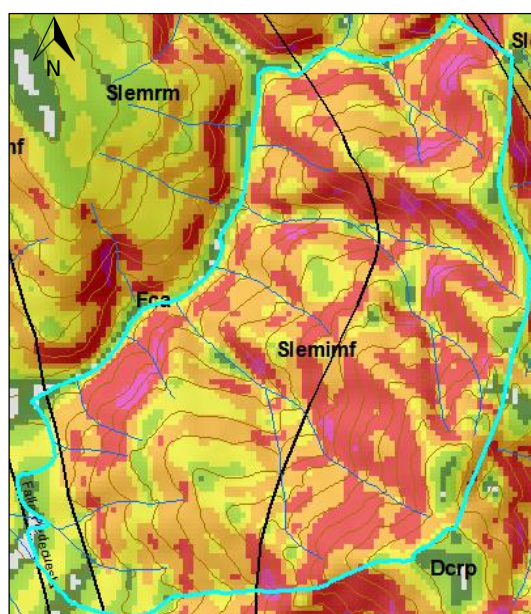


Figura 65. Modelo de pendientes donde se identifica la subunidad ladera estructural media, irregular y moderada a fuerte

**Ladera estructural media, regular y moderada (Slemrm):** esta subunidad se encuentra al oeste del casco urbano de Santa Bárbara, en la vereda Poblano, se encuentra asociada a la traza de la falla Romeral y otras fallas que siguen la tendencia regional NW

(Figura 66), se pueden observar algunos deslizamientos de subtipo traslacional de áreas mayores y menores a 1600 m<sup>2</sup>.

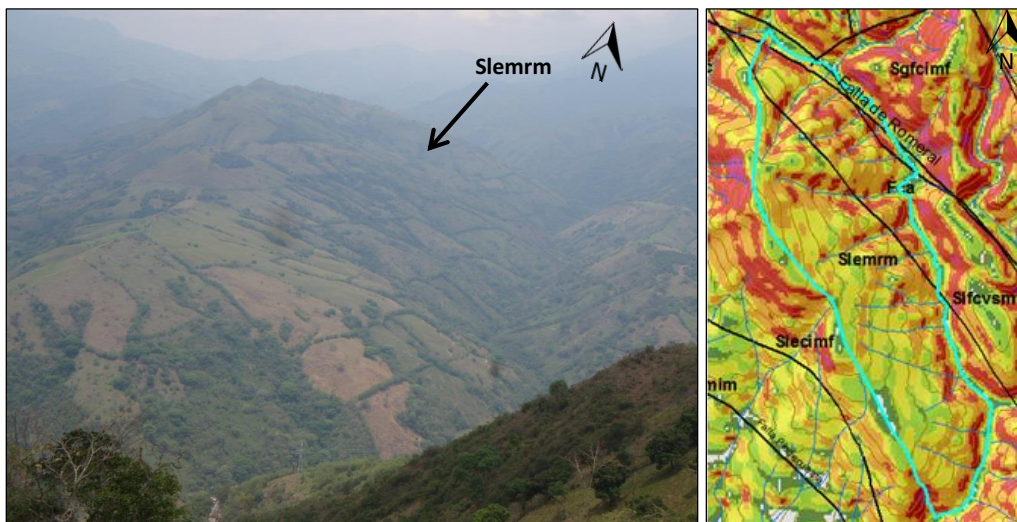


Figura 66. Subunidad y modelo de pendientes de la ladera estructural media, regular y moderada.

Esta geoforma se identificó igualmente al norte del municipio de Santa Bárbara, al oeste del corregimiento de Versailles, se encuentra asociada al trazo de la falla de Minas, a la presencia de deslizamientos de subtipo traslacionales y rotacionales en menor medida, y también de algunos flujos de tierra (Figura 67).



Figura 67. Subunidad ladera estructural media, regular y moderada.

**Ladera estructural media, regular y moderada a fuerte (Slemrmf):** esta subunidad se localiza al oeste de la zona de estudio, en la vereda Las Mercedes, se encuentra asociada

al trazo de la falla de Minas y a algunos deslizamientos traslacionales de áreas mayores y menores a 1600 m<sup>2</sup> (Figura 68).

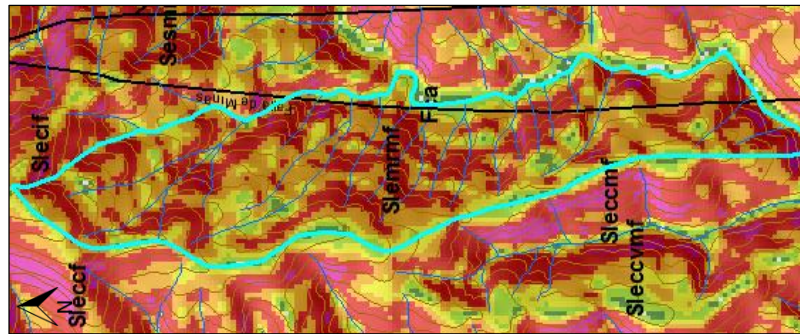


Figura 68. Modelo de pendientes donde se delimita la subunidad ladera estructural de longitud media, regular y moderada a fuerte.

**6.3.2.9 Lomo de falla (Slf):** prominencia topográfica de morfología alomada, con laderas cortas a muy cortas, forma convexa y pendiente abrupta a escarpada, localizados a lo largo de una falla de rumbo y formados por el efecto combinado del desplazamiento lateral y la geometría del plano de falla que determina la expulsión de un bloque de terreno (SGC, 2013). Se caracteriza por su alto fracturamiento y estructuras de tipo flor positiva. De acuerdo con su longitud (corta, media o larga); forma (regular, irregular, cóncava, convexa) y pendiente (plana, muy suave, suave, moderada, fuerte, muy fuerte y escarpada) se han definido 2 subunidades que se describen a continuación:

**Lomo de falla corto, convexo y suave a moderado (Slfcvsm):** esta subunidad se localiza en la vereda El Helechal, al oeste del casco urbano de Santa Bárbara, asociado al trazo de la falla de Romeral (Figura 69) y presenta movimientos en masa, que se pueden observar incluso desde la Troncal, de subtipo deslizamientos traslacionales (Figura 70).



Figura 69. Lomo de falla corto, convexo y suave a moderado.





Figura 70. Lomo de falla corto, convexo y suaves a moderado, donde se puede observar una cicatriz de deslizamiento inactivo.

**Lomo de falla corto, convexo y moderado (Slcvm):** se identificó esta geoforma en la vereda Alto de los Gómez, a margen derecha de la quebrada La Loma (Figura 71), se encuentra asociado al trazo de la falla de Minas. Esta subunidad se caracteriza por presentar importantes deslizamientos traslacionales y algunos deslizamientos rotacionales.



Figura 71. Lomo de falla corto, convexo y moderado.

**6.3.2.10 Mesa estructural (Sm):** Zona elevada de terreno con una cima plana.

**Mesa estructural corta, regular y pendiente moderada (Smcrm):** esta subunidad presenta pendientes moderadas a fuertes, es regular y tiene una longitud corta (Figura 72). Se encuentra localizada al sur de Damasco, presenta poca incisión, procesos erosivos, cima plana y un proceso gravitacional tipo deslizamiento traslacional.



Figura 72. Mesa estructural corta, regular y moderada.

### 6.3.3 AMBIENTE FLUVIAL

El ambiente fluvial y lagunar corresponde a las geoformas que se originan por procesos de erosión de las corrientes de los ríos y por la acumulación o sedimentación de materiales en las áreas aledañas a dichas corrientes, tanto en épocas de grandes avenidas e inundación, como en la dinámica normal de las corrientes y durante épocas secas (SGC, 2013).

El ambiente fluvial está representado en la zona de estudio en el sector oeste y este principalmente, asociado con la dinámica del río Poblano y el río Buey respectivamente. Otros cauces menores generan geoformas de origen fluvial como son el río Arma, y las quebradas Sabaleticas, La Loma y Las Frías. Las diferentes barras identificadas están asociadas al río Poblano y localizadas en su mayoría en las áreas con menor pendiente al suroeste del área de estudio.

**6.3.3.1 Barra lateral (Fbla):** cuerpo de forma alargada y de morfología suave, que se forma junto a la orilla en cauces semirectos o sinuosos, se desarrollan en áreas de energía relativamente baja a lo largo de las porciones laterales de la corriente principal, estas barras pueden moverse a lo largo del cauce y migrar. Las barras laterales alternadas en los cauces semirectos pueden ser precursoras de procesos de meanderización (SGC, 2013). Esta geoforma se localiza tanto en el río Poblano como en la quebrada Sabaleticas y no se encuentra asociada a ningún tipo de proceso morfodinámico (Figura 73).

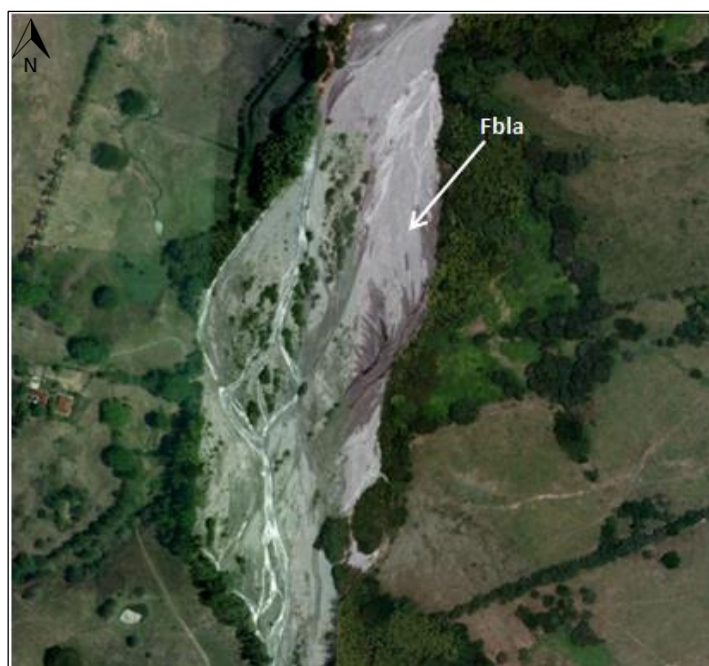


Figura 73. Ortofotografía donde se identifica la subunidad de barra lateral sobre el río Poblano.

**6.3.3.2 Barra longitudinal (Fbl):** Cuerpo elongado, en forma romboidal convexo en planta y en superficie de morfología suave ondulada, dispuesto paralelo al centro de los cauces fluviales mayores, con la punta más aguda en la dirección de la corriente. Su origen es relacionado a la acumulación de sedimentos durante grandes inundaciones, que luego de disminuir el caudal, quedan como remanentes que dividen la corriente. Su depósito está constituido principalmente por arenas y gravas finas (SGC, 2013). Esta geoforma se localiza en el cauce del río Poblano y no se encuentra asociada a ningún tipo de proceso morfodinámico (Figura 74).





Figura 74. Ortofotografía donde se identifica la subunidad de barra longitudinal dentro del río Poblano.

**6.3.3.3 Barra puntual (Fbp):** Cuerpo en forma de medialuna de morfología suave ondulada, compuesta de crestas y artesas curvas de poca altura. Estos cuerpos se localizan en la parte cóncava de los meandros de los ríos, como producto de la acumulación de sedimentos erodados de la parte convexa del cauce. Su depósito está constituido por sedimentos generalmente arenosos finos y materiales arcillosos en las artesas. Cuando se dan procesos de migración lateral del cauce, la acumulación de este tipo de barras, pueden conformar conjuntos sencillos o complejos de oríllales (SGC, 2013). Esta subunidad fue definida en el cauce del río Poblano y en la quebrada Sabaleticas, no se encuentra asociada a ningún tipo de proceso gravitacional o erosivo (Figura 75).



Figura 75. Ortofotografía donde se identifica la subunidad de barra puntual sobre el río Poblano.

**6.3.3.4 Cauce aluvial (Fca):** Canal de forma irregular excavado por corrientes perennes o estacionales, dentro de macizos rocosos y/o sedimentos aluviales y que dependiendo de factores como pendiente, resistencia del lecho, carga de sedimentos y caudal, pueden persistir por grandes distancias. Cuando las corrientes fluyen en macizos rocosos se da un proceso básico de erosión, entallando dicho macizo y moviéndose lateralmente dentro de rocas menos resistentes. En este tipo de cauce el mayor socavamiento se da en las partes superiores de su curso, donde es mayor el gradiente y la carga de sedimentos es más gruesa. En presencia de rocas más resistentes, el curso es muy irregular con la presencia de saltos producto del cambio de resistencia en la roca, fallamiento o deslizamientos que conforman apilamientos.

Cuando las corrientes fluyen en zonas semiplanas a planas (llanura aluvial), los cauces son de tipo meándrico o divagante, como producto del cambio súbito de la dirección del flujo. Dependiendo la cantidad de carga de sedimentos, la pendiente y caudal pueden llegar a formar sistemas anastomosados, trenzados, divergentes y otras geoformas asociadas (SGC, 2013).

Esta subunidad es definida para el cauce actual del río Poblano (Figura 76), localizado en el sector suroeste del municipio de Santa Bárbara. También se define esta subunidad para el río Buey, en el sector sureste; la quebrada Sabaleticas al sur y la quebrada La Loma en el centro de la zona de estudio. Esta geoforma se encuentra en algunos sectores afectada en las orillas por procesos de socavación o por algunos deslizamientos de subtipo traslacional y/o flujos de tierras.



Figura 76. Cauce activo del río Poblano.

**6.3.3.5 Terraza de acumulación (Fta):** Superficie elongada, plana a suavemente ondulada, modelada sobre sedimentos aluviales, que se presenta en forma pareada a lo largo del cauce de un río al cual limitan por escarpes de diferente altura. Su origen está relacionado a procesos de erosión y acumulación aluvial, dentro de antiguas llanuras de inundación. Su formación incluye fases de acumulación, incisión y erosión vertical (SGC, 2013). Estas terrazas pueden ser parte de cauces rectos a meándricos. Su depósito está constituido por gravas arenas, limos y arcillas, con disminución del tamaño a medida que se aleja del cauce del río. De acuerdo con su longitud, forma y pendiente se han definido 2 subunidades que se describen a continuación:

**Terraza de acumulación alargada, amplia y muy suave (Ftaams):** esta subunidad se encuentra localizada al este del municipio de Santa Bárbara, perteneciente al río Buey, sobre Depósitos de Aluviones Recientes (Figura 77). No presenta movimientos en masa ni procesos erosivos asociados.

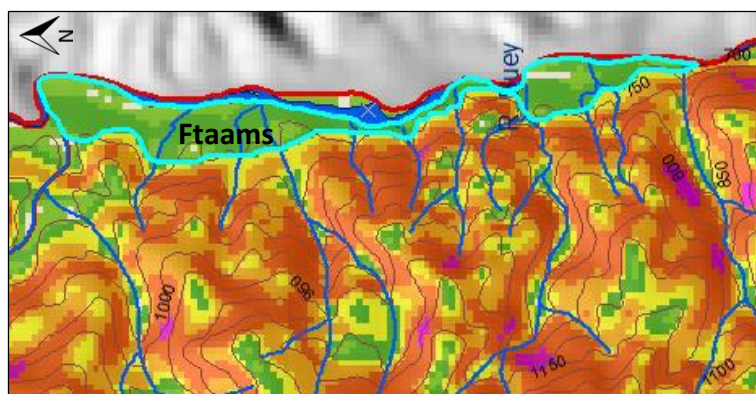


Figura 77. Mapa de pendientes con el que se delimita la subunidad de Terraza de acumulación alargada, amplia y muy suave del río Buey.

**Terraza de acumulación alargada, regular y muy suave (Ftarms):** esta subunidad fluvial se localiza al oeste del municipio de Santa Bárbara, en límites con el municipio de Fredonia; no tiene asociados procesos gravitacionales ni erosivos (Figura 78).



Figura 78. Mapa de pendientes con el que se delimita la subunidad de Terraza de acumulación alargada, regular y muy suave del río Poblano.

#### 6.4 COBERTURAS

La cobertura de la tierra es un resultado de la interacción de la dinámica natural geológica, geomorfológica, los suelos, el clima y sistemas de comunidades bióticas, interrumpida por el hombre para su supervivencia y desarrollo. Dicha interrupción genera o contribuye a la aparición de diferentes procesos como cambios en el patrón de ciclos hidrológicos, cambios en las formas del relieve (en gran número de casos en forma negativa produciendo movimientos en masa, flujos, avalanchas, erosión), afectación en la evolución de las especies, deterioro de ecosistemas, entre otros. Esta relación e interdependencia de los recursos evaluados (incluyendo la cobertura y uso del suelo), sirven para estimar la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa, en cuya expresión se manifieste el efecto del hombre (SGC, 2013).

Las coberturas identificadas en el municipio se describen según la metodología Corine Land Cover en IDEAM, 2010. En la siguiente tabla se muestran cada una de las coberturas terrestres del municipio, con su respectiva área y porcentaje respecto a la extensión total y en la figura 79 el mapa de coberturas para Santa Bárbara.

Tabla 6. Descripción de las coberturas terrestres del municipio de Santa Bárbara.

CÓDIGO	UNIDAD	TOTAL ÁREA (ha)	PORCENTAJE (%)
1.1.1	Tejido urbano continuo	41,98	0,23
1.1.2	Tejido urbano discontinuo	20,91	0,12
1.2.1	Zonas industriales o comerciales	0,70	0,004
2.2.3	Cultivos permanentes arbóreos	4,53	0,03
2.2.5	Cultivos confinados	2150,22	11,97
2.3.1	Pastos limpios	4215,34	23,46
2.3.2	Pastos arbolados	221,53	1,23

<b>CÓDIGO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>TOTAL ÁREA (ha)</b>	<b>PORCENTAJE (%)</b>
2.3.3	Pastos enmalezados	1220,69	6,79
2.4.2	Mosaico de pastos y cultivos	690,69	3,84
2.4.3	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	7800,56	43,42
2.4.4	Mosaico de pastos con espacios naturales	8,97	0,05
3.1.2.1	Bosque abierto alto	356,33	1,98
3.1.2.2	Bosque abierto bajo	355,98	1,98
3.2.2	Arbustal	747,83	4,16
3.3.1	Zonas arenosas naturales	0,03	0,00
5.1.1	Ríos (50 m)	129,99	0,72



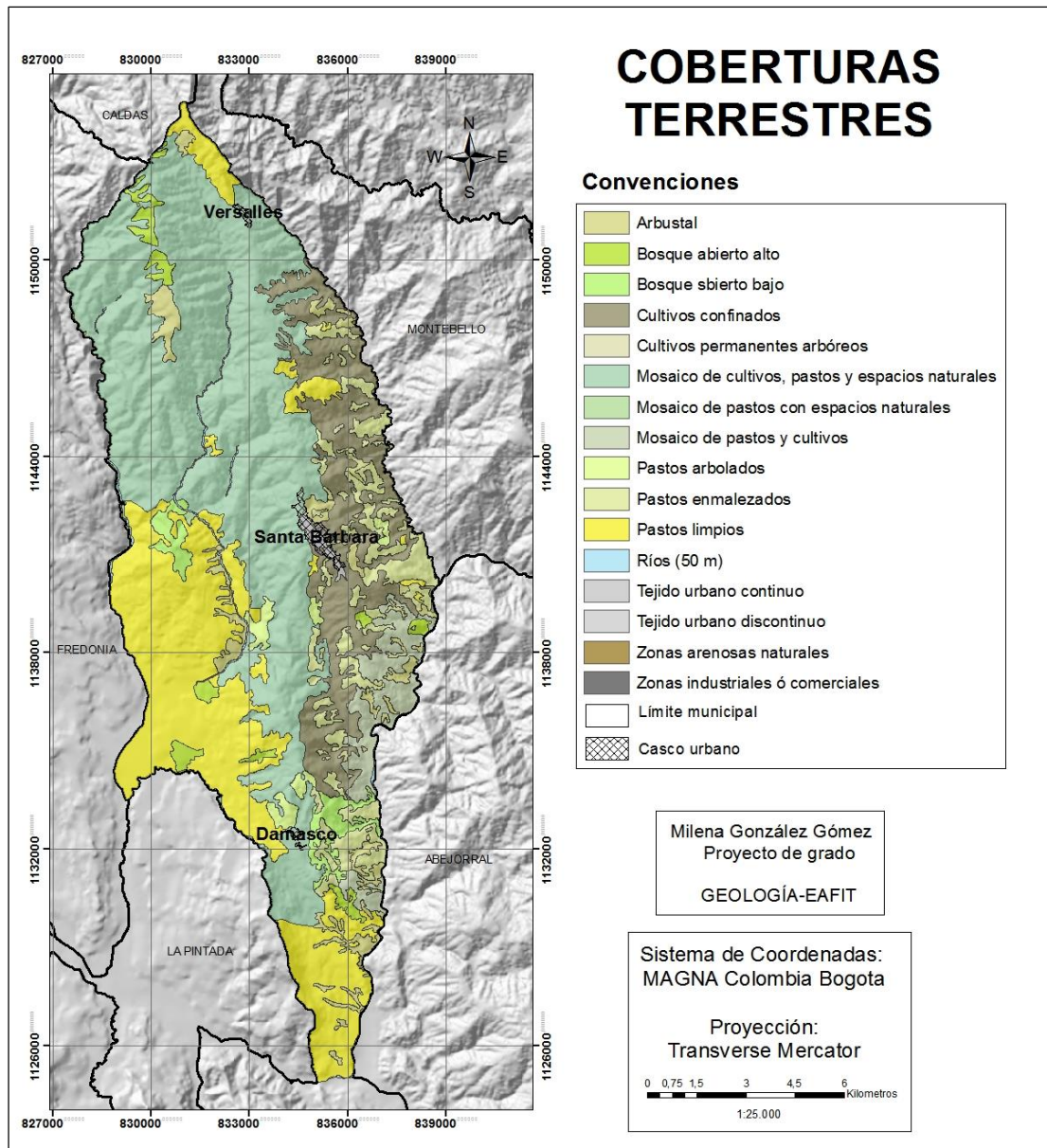


Figura 79. Mapa de coberturas terrestres del municipio de Santa Bárbara, Antioquia.

1.1.1 Tejido urbano continuo: son espacios conformados por edificaciones y los espacios adyacentes a la infraestructura edificada. La vegetación y el suelo desnudo representan una baja proporción del área del tejido urbano. Esta cobertura tiene una extensión de 41,98 ha, que corresponden al 0,23% del área total y dentro de ésta categoría se encuentra la cabecera urbana del municipio (IDEAM, 2010).

1.1.2 Tejido urbano discontinuo: son espacios conformados por conjuntos de edificaciones y zonas verdes. Las edificaciones, vías e infraestructura construida cubren la superficie del terreno de manera dispersa y discontinua, ya que el resto del área está cubierta por vegetación. Esta cobertura tiene una extensión de 20,91 ha, que corresponden al 0,12% del municipio; esta categoría se encuentra localizada al sureste del casco urbano de Santa Bárbara (IDEAM, 2010).



1.2.1 Zonas industriales o comerciales: son las áreas cubiertas por infraestructura artificial (terrenos cimentados, alquitranados, asfaltados o estabilizados), sin presencia de áreas verdes dominantes, las cuales se utilizan también para actividades comerciales o industriales. Comprende una extensión de 0,7 ha, corresponde a tan solo el 0,004% del municipio y está ubicada en límites con el municipio de Montebello en la vereda La Primavera (IDEAM, 2010).

2.2.3 Cultivos Permanentes Arbóreos: cobertura principalmente ocupada por cultivos de hábito arbóreo, diferentes de plantaciones forestales maderables o de recuperación, como cítricos, palma, mango, etc. En el municipio de Santa Bárbara esta categoría pertenece principalmente a cultivos de mango y se encuentra al noreste del casco urbano del municipio. La extensión ocupada por los cultivos permanentes arbóreos es de 4,53 ha, que corresponde al 0,03% del área total del municipio (IDEAM, 2010).

2.2.5 Cultivos confinados: comprenden las tierras ocupadas por cultivos bajo infraestructuras de invernaderos, principalmente dedicadas al cultivo de flores, frutales y hortalizas. Incluye toda aquella estructura cerrada cubierta por materiales transparentes, dentro de la cual es posible obtener unas condiciones artificiales de microclima, y con ello cultivar plantas en condiciones óptimas. Esta cobertura corresponde al 11,97% del total del área de estudio, ocupando 2150,22 ha y se localiza al este del municipio (IDEAM, 2010).

2.3.1 Pastos limpios: esta cobertura comprende las tierras ocupadas por pastos limpios con un porcentaje de cubrimiento mayor a 70%; la realización de prácticas de manejo (limpieza, encalamiento y/o fertilización, etc.) y el nivel tecnológico utilizados impiden la presencia o el desarrollo de otras coberturas. Esta cobertura ocupa una extensión de 4215,34 ha, comprende el 23,46% del total del área de estudio y se encuentra localizada en distintas zonas del municipio, al norte en límites con Caldas y Montebello, al suroeste en límites con Fredonia y La Pintada, al sureste en límites con La Pintada y Abejorral y en el centro del municipio (IDEAM, 2010).

2.3.2 Pastos arbolados: Cobertura que incluye las tierras cubiertas con pastos, en las cuales se han estructurado potreros con presencia de árboles, distribuidos en forma dispersa. Esta categoría se identificó al norte del corregimiento de Damasco y en el centro del municipio de Santa Bárbara, cerca de la cabecera urbana de éste, ocupa un área de 221,53 ha y corresponden al 1,23% del territorio (IDEAM, 2010).

2.3.3 Pastos enmalezados: Son las coberturas representadas por tierras con pastos y malezas conformando asociaciones de vegetación secundaria, debido principalmente a la realización de escasas prácticas de manejo o la ocurrencia de procesos de abandono. Dentro de esta categoría se asumen aquellos pastos sin ningún tipo de manejo que aunque no tengan asociaciones de malezas o árboles se encuentran en las laderas o en

áreas dentro de diferentes coberturas de bosque y/o plantación forestal. Esta cobertura se encuentra distribuida al este del municipio y tiene una extensión de 1220,69 ha, que corresponden al 6,79% de la superficie total del municipio (IDEAM, 2010).

2.4.2 Mosaico de pastos y cultivos: comprende las tierras ocupadas por pastos y cultivos, en los cuales el tamaño de las parcelas es muy pequeño (inferior a 25 ha) y el patrón de distribución de los lotes es demasiado intrincado para representarlos cartográficamente de manera individual. Esta cobertura tiene una extensión de 690,69 ha, que corresponden al 3,844 % del área total y se localiza al este del municipio en límites con Montebello (IDEAM, 2010).

2.4.3 Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales: comprende las superficies del territorio ocupadas principalmente por coberturas de cultivos y pastos en combinación con espacios naturales. En esta unidad, el patrón de distribución de las coberturas no puede ser representado individualmente, como parcelas con tamaño mayor a 25 hectáreas. Las áreas de cultivos y pastos ocupan entre 30% y 70% de la superficie total de la unidad. Los espacios naturales están conformados por las áreas ocupadas por relictos de bosque natural, arbustales, bosque de galería o riparios, vegetación secundaria o en transición, pantanos y otras áreas no intervenidas o poco transformadas, que debido a limitaciones de uso por sus características biofísicas permanecen en estado natural o casi natural. Esta es la cobertura terrestre predominante en el municipio, encontrándose de manera general en toda su extensión y ocupando un área de 7800,56 ha, que corresponde al 43,42 % de la superficie total (IDEAM, 2010).

2.4.4 Mosaico de pastos con espacios naturales: constituida por las superficies ocupadas principalmente por coberturas de pastos en combinación con espacios naturales. En esta unidad, el patrón de distribución de las zonas de pastos y de espacios naturales no puede ser representado individualmente y las parcelas de pastos presentan un área menor a 25 ha. Las coberturas de pastos representan entre 30% y 70% de la superficie total del mosaico. Los espacios naturales están conformados por las áreas ocupadas por relictos de bosque natural, arbustales, bosque de galería o ripario, pantanos y otras áreas no intervenidas o poco transformadas y que debido a limitaciones de uso por sus características biofísicas permanecen en estado natural o casi natural. Esta cobertura tiene una extensión de 8,97 ha, que corresponden al 0,05% de la superficie total del municipio y se encuentra en la vereda Poblano (IDEAM, 2010).

3.1.2.1 Bosque abierto alto: constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente arbóreos regularmente distribuidos, los cuales forman un estrato de copas (dosel) discontinuo, con altura del dosel superior a 15 metros, y cuya área de cobertura arbórea representa entre 30% y 70% del área total de la unidad. Estas formaciones vegetales no han sido intervenidas o su intervención ha sido selectiva y no ha alterado su estructura original y las características funcionales. Corresponde al

356,33 ha, ocupa el 1,98% del área total de estudio y se encuentra dispersa al sur del municipio de Santa Bárbara (IDEAM, 2010).

3.1.2.2 Bosque abierto bajo: cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente arbóreos regularmente distribuidos, los cuales forman un estrato de copas (dosel) discontinuo, con altura del dosel superior a 5 m e inferior a 15 m, y cuya área de cobertura arbórea representa entre 30% y 70% del área total de la unidad. Estas formaciones vegetales no han sido intervenidas o su intervención ha sido selectiva y no ha alterado su estructura original y las características funcionales. Esta categoría se identificó al este del casco urbano de Damasco y ocupa un área de 355,98 ha, que corresponden al 1,98% del territorio (IDEAM, 2010).

3.2.2 Arbustal: comprende los territorios cubiertos por vegetación arbustiva desarrollados en forma natural en diferentes densidades y sustratos. Un arbusto es una planta perenne, con estructura de tallo lenoso, con una altura entre 0,5 y 5 m, fuertemente ramificado en la base y sin una copa definida. Esta cobertura ocupa un área de 747,83 ha, que corresponden al 4,16 % del territorio y se encuentra dispersa a lo largo de toda el área de estudio (IDEAM, 2010).

3.3.1 Zonas arenosas naturales: son terrenos bajos y planos constituidos principalmente por suelos arenosos y pedregosos, por lo general desprovistos de vegetación o cubiertos por una vegetación de arbustal ralo y bajo. Se encuentran conformando playas litorales, playas de ríos, bancos de arena de los ríos y campos de dunas. También se incluyen las superficies conformadas por terrenos cubiertos por arenas, limos o guijarros ubicados en zonas planas de los ambientes litoral y continental, que actualmente no están asociadas con la actividad de los ríos, el mar o el viento. Esta es la cobertura que tiene menor extensión en el Municipio, comprende 0,03 ha, que corresponden al 0,0002% del área total y se localiza al suroeste de Santa Bárbara, limitando con La Pintada (IDEAM, 2010).

5.1.1 Ríos (50m): un río es una corriente natural de agua que fluye con continuidad, posee un caudal considerable y desemboca en el mar, en un lago o en otro río. Se considera como unidad mínima cartografiable, aquellos ríos que presenten un ancho del cauce mayor o igual a 50 m. Esta cobertura ocupa un área de 129,99 ha, que corresponden al 0,72% del territorio y se encuentra distribuida a lo largo de toda la zona de estudio, donde están ubicados los drenajes dobles de ésta, tales como el río Poblano, las quebradas La Loma, La Máquina, entre otros (IDEAM, 2010).

## 7. MOVIMIENTOS EN MASA

Para la identificación, delimitación y caracterización de los movimientos en masa, se utilizó el inventario de procesos del sistema de información SIMMA, los sensores remotos como ortofotos e imágenes satelitales, el inventario de campo y las variables geométricas derivadas del DEM; con estas herramientas se obtuvo la distribución espacial de los movimientos en masa y el comportamiento del relieve asociado a las características del material.

Para una representación adecuada según la escala de trabajo, los procesos que tienen un área inferior a 1600 m<sup>2</sup>, se representaron con puntos y los procesos con un área mayor o igual a 1600 m<sup>2</sup> se delimitaron mediante polígonos. En el municipio de Santa Bárbara se cartografiaron principalmente por medio de las ortofotos, un total de 671 movimientos en masa, de los cuales el 83% corresponden a movimientos en masa con un área menor a 1600 m<sup>2</sup> y el 17% restante a procesos con un área mayor o igual a 1600 m<sup>2</sup>. Estos procesos se distribuyen a lo largo de todo el Municipio, afectando principalmente la zona norte de éste (Figura 80).

El subtipo de movimiento en masa con mayor recurrencia en el municipio son los deslizamientos traslacionales, de los cuales se identificaron para la zona de estudio 638, que corresponden al 93,69% del área afectada total, seguido de 21 deslizamientos rotacionales, que comprenden al 4,50% del área afectada y por último se delimitaron 12 flujos de tierras, los cuales corresponden al 1,80% del área total afectada (Tabla 7).

Tabla 7. Descripción de los movimientos en masa.

SUBTIPO DE MOVIMIENTO	TOTAL	AREA (ha)	PORCENTAJE (%)
Deslizamiento Rotacional	21	89846,09	4,50
Deslizamiento Traslacional	638	1868798,77	93,69
Flujo de tierras	12	35938,43	1,80

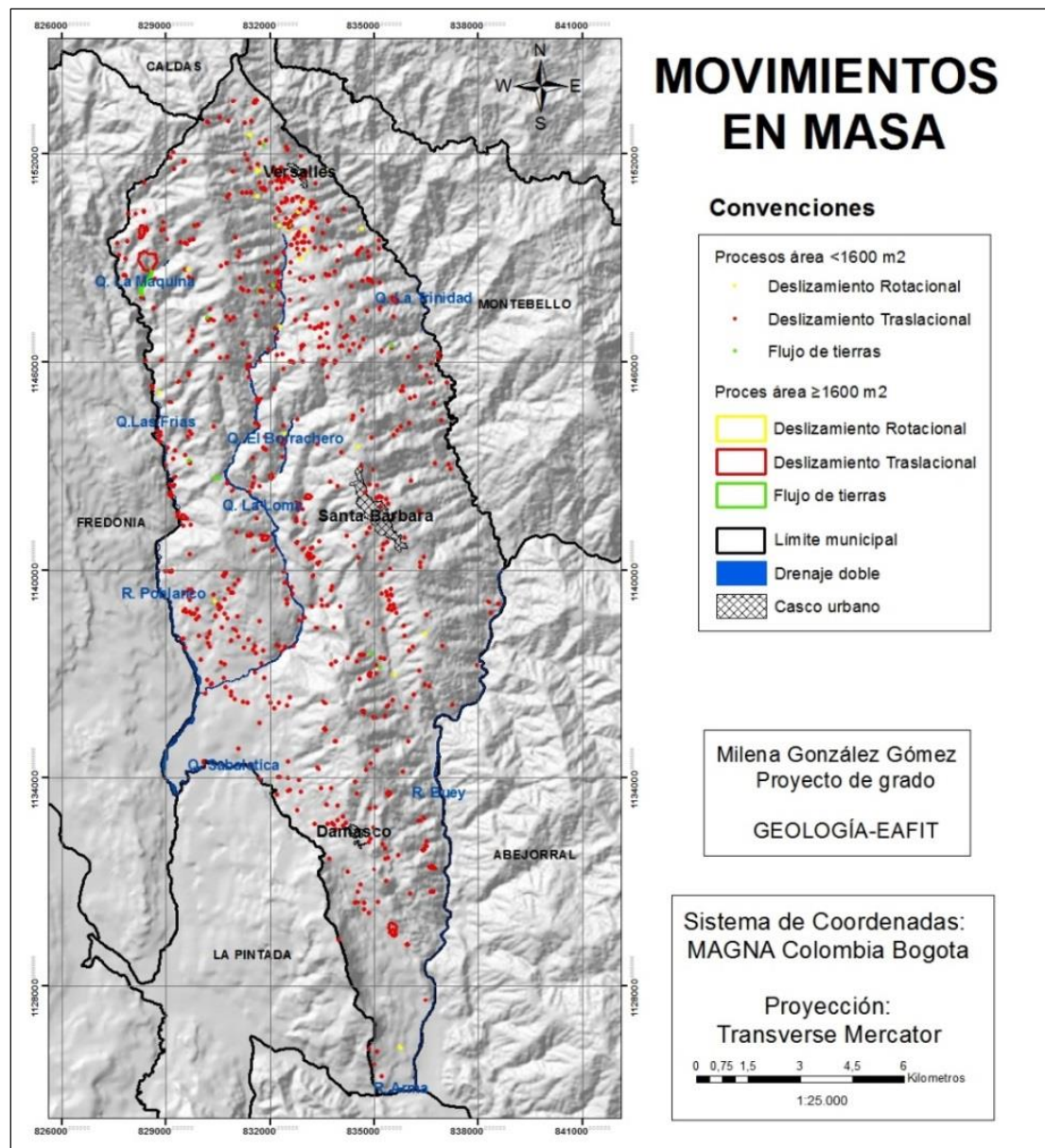


Figura 80. Mapa de la localización de los movimientos en masa. Santa Bárbara, Antioquia.

Los diferentes tipos de procesos se encuentran asociados a los grados de meteorización identificados como VI, V y IV según Dearman (1974), pues se encontraban desde el nivel de suelo residual, hasta el material de roca muy descompuesto; adicionalmente las superficies de falla están principalmente, relacionadas a las zonas de contacto de los suelos residuales y la roca meteorizada o saprolito (grado VI y V).

Estos eventos están asociados a diferentes factores, tanto naturales como antrópicos. Entre las causas naturales se encuentra principalmente, la inestabilidad del terreno, como respuesta a la alta densidad de fallas y lineamientos; la saturación de los suelos por períodos intensos de lluvias y las propiedades mecánicas de los suelos que en algunas ocasiones corresponden a saprolitos altamente susceptibles a la generación de movimientos en masa y procesos de erosión. Otros factores naturales, que favorecen

los deslizamientos son las fuertes pendientes, la forma y longitud de las laderas. Entre las causas asignadas a los factores antrópicos, se encuentran, el mal manejo de taludes por construcciones o vías, ausencia de sistemas de drenaje de aguas, deforestación, inadecuado uso del suelo como por ejemplo sobrepastoreo, etc.

Los procesos observados en la salida de campo, han tenido gran influencia en el modelado del paisaje, de igual manera presentan diferentes y en algunos casos, importantes grados de afectación para las personas.

### **7.1 DESLIZAMIENTOS: SUBTIPO TRASLACIONAL**

Como ya se mencionó anteriormente, en la zona de estudio, la mayoría de movimientos en masa fueron clasificados como deslizamientos subtipo traslacional, de los cuales, los de mayor área se encuentran al norte o noroeste de Santa Bárbara. Se caracterizan por su gran tamaño y afectación a las personas, se encuentran asociados principalmente al miembro volcánico de la Formación Quebradagrande y los Gabros.

A continuación se presentan los procesos más importantes de ésta categoría (Figuras 81, 82, 83 y 84).



Figura 81. Ortofoto donde se identifica un deslizamiento traslacional, ubicado en la vereda La Arcadia, en cercanías a la Q. La Máquina.



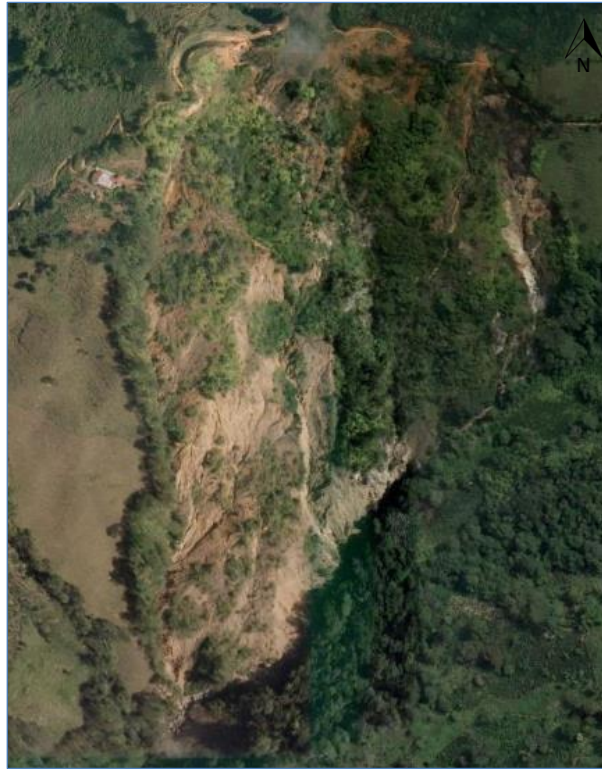


Figura 82. Ortofoto donde se identifica un deslizamiento traslacional, ubicado en la vereda La Arcadia, al noroeste del municipio.



Figura 83. Ortofoto donde se identifica un deslizamiento traslacional, ubicado al oeste del casco urbano de Santa Bárbara.



Figura 84. Ortofoto donde se identifica un deslizamiento traslacional, ubicado en la vereda Poblano, a la derecha se observa la Q. La Loma.

## 7.2 DESLIZAMIENTOS: SUBTIPO ROTACIONAL

En las figuras 85, 86 y 87, se pueden observar los deslizamientos más importantes de esta categoría para la zona de estudio, los cuales se encuentran distribuidos a lo largo del municipio, principalmente al norte y están asociados a la Formación Quebradagrande, los Gabros y el Stock de la Úrsula.



Figura 85. Ortofoto donde se identifica un deslizamiento rotacional, situado al sur del municipio, cerca de la vereda El Buey.





Figura 86. Ortofoto donde se identifica un deslizamiento rotacional, ubicado al oeste del casco urbano de Versalles.



Figura 87. Ortofoto donde se identifica un deslizamiento rotacional, que se encuentra al noroeste del casco urbano de Versalles.

### 7.3 FLUJOS: FLUJOS DE TIERRA

Por último, se presentan flujos en menor cantidad y área. Los procesos de éste tipo observados en el municipio de Santa Bárbara, son flujos de tierra, la mayoría de los

cuales, suceden producto de un deslizamiento (pues son un tipo de flujo muy superficial). Se localizan al noroeste del municipio principalmente en los drenajes dobles. Estos flujos pueden ser canalizados o concentrados por los detalles del relieve, la pendiente, la saturación de los poros, etc. (Figura 88 y Figura 89).



Figura 88. Ortofoto donde se identifica un flujo de tierra, localizado en la vereda Poblano, cerca de la Q. La Loma.



Figura 89. Ortofoto donde se identifica un flujo de tierras, como resultado de un deslizamiento, ubicado en el centro de la vereda Morroplano.

## **8. SUSCEPTIBILIDAD**

### **8.1 SUSCEPTIBILIDAD CON EL MÉTODO HEURÍSTICO**

La susceptibilidad de la zona de estudio por movimientos en masa, según el método heurístico, se generó a partir de las siguientes variables condicionantes, la geología, la geomorfología y la cobertura terrestre. También, de la morfometría obtenida a partir del DEM, fueron elaborados la rugosidad, las pendientes, la curvatura y el relieve relativo.

Una vez se tenían las diferentes unidades de cada una de las variables condicionantes, se realiza una valoración cualitativa (en una escala del 1 a 9, solo números impares) a la susceptibilidad a deslizamientos y flujos, categorizando y ponderando, según la opinión de algunos expertos, el potencial de cada factor condicionante a los movimientos en masa. Para evaluar la susceptibilidad a este tipo de fenómenos, se suman todas las variables y a su vez estas se multiplican por el peso que se le otorga según el criterio experto para medir el potencial de cada factor a la ocurrencia de deslizamientos y flujos. Los pesos determinantes para cada factor fueron: geología (15%), geomorfología (20%), pendientes (25%), relieve relativo (15%), rugosidad (10%), cobertura (10%) y curvatura (5%).

Para asignar los valores de susceptibilidad alta, media y baja, se graficaron los porcentajes de área acumulada de los diferentes rangos de susceptibilidad (se subdividió la susceptibilidad en 50 clases) organizados de mayor a menor, versus el porcentaje acumulado de movimientos en masa.

#### **8.1.1 SUSCEPTIBILIDAD POR DESLIZAMIENTOS**

Se estableció para los deslizamientos, como el valor de susceptibilidad alta la clase en la cual se presentaba el 60% de los movimientos, la cual representaba el 52% del área acumulada, y como el valor de susceptibilidad media el que representaba el 90% de los movimientos en masa y que estaba alrededor del 78% del área acumulada. Por lo tanto solo el 10% de los deslizamientos se ubican en la categoría de susceptibilidad baja (Figura 90).



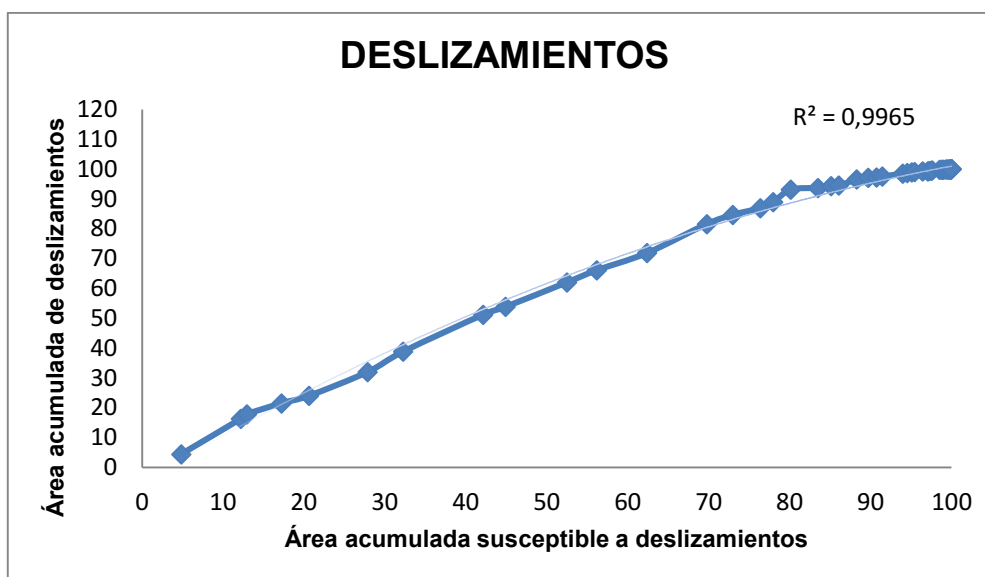


Figura 90. Gráfica de los valores de susceptibilidad para deslizamientos por el método heurístico.

El mapa de susceptibilidad por deslizamientos en Santa Bárbara, según el método heurístico, se categoriza en 3 rangos: Alta, Media y Baja (Figura 91) y el consolidado de las áreas involucradas y el porcentaje en cada categoría se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 8. Descripción susceptibilidad a deslizamientos por el método heurístico.

SUSCEPTIBILIDAD	TOTAL ÁREA (ha)	PORCENTAJE (%)
Alta	9404,23	52,49
Media	4560,01	25,45
Baja	3951,86	22,06

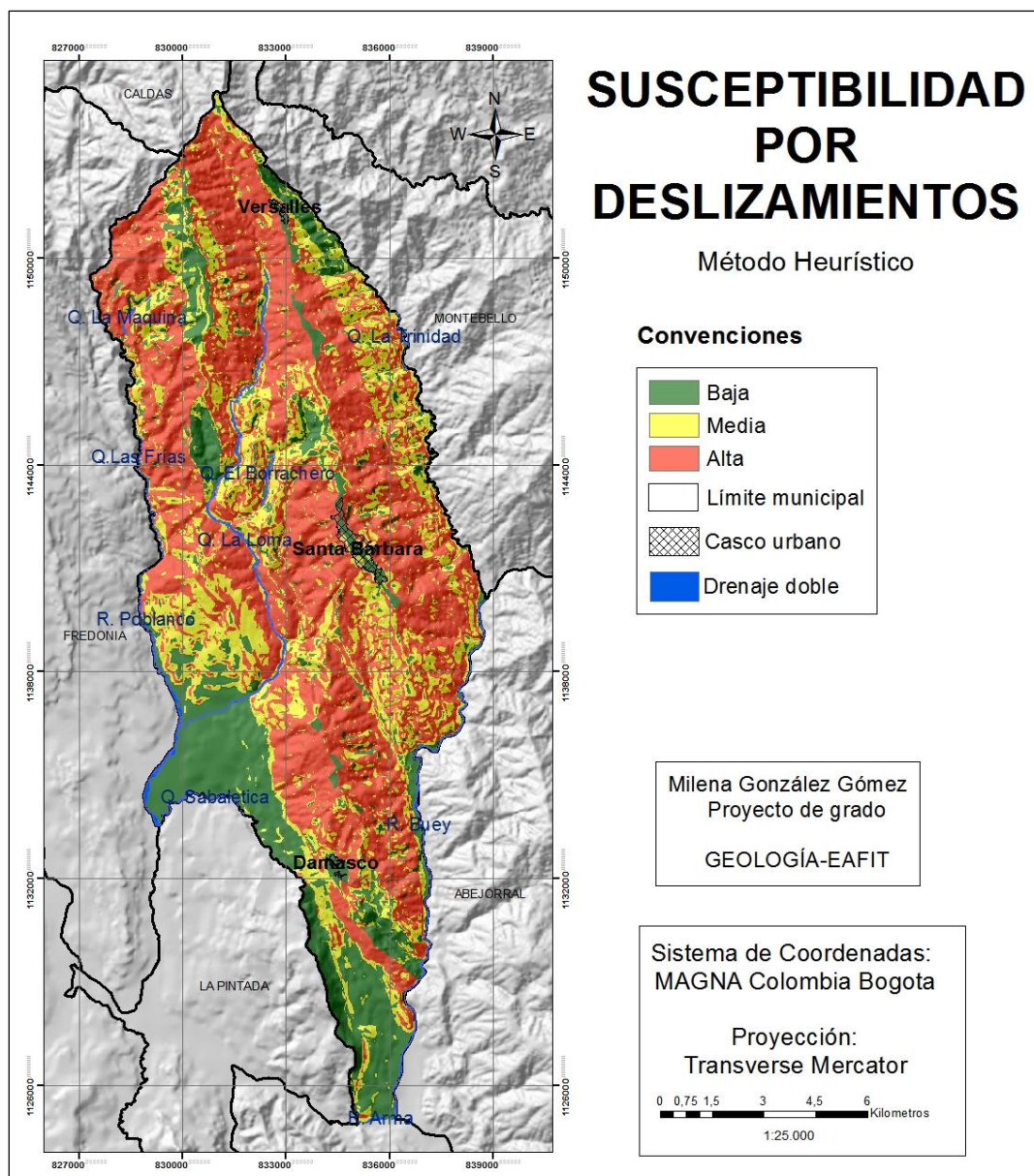


Figura 91. Mapa de susceptibilidad por deslizamientos según el método heurístico, municipio de Santa Bárbara.

### 8.1.1.1 Susceptibilidad Alta

Para el municipio de Santa Bárbara predomina la susceptibilidad alta por deslizamientos, ocupando una extensión de 9404,23 ha, que comprende un 52,49% del área total. Estas zonas se encuentran distribuidas alrededor de todo el municipio, exceptuando los extremos suroeste y sureste.

Este rango de susceptibilidad corresponde a pendientes moderadas a muy fuertes, se encuentra asociado a las unidades geomorfológicas de ambiente estructural, como lo son la mayoría de espolones, laderas estructurales, el lomo de falla (de la vereda El Helechal), entre otras, presentes en el área. Se encuentra asociado litológicamente a la

Formación Quebradagrande, Gabros y al Grupo Cajamarca. Respecto a las coberturas terrestres, las zonas de susceptibilidad alta están distribuidas principalmente en el mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, seguido de los cultivos confinados, los pastos enmalezados, entre otros.

#### **8.1.1.2 Susceptibilidad Media**

La susceptibilidad media por deslizamientos, ocupa una extensión de 4560,01 ha, que corresponden a 25,45% del área total y se encuentra distribuida alrededor de todo el municipio, exceptuando el extremo suroeste y sureste de éste.

Estas zonas de susceptibilidad media por deslizamientos se asocian a pendientes suaves a moderadas; geomorfológicamente se encuentran principalmente en las unidades de ambiente estructural, como las laderas estructurales de longitudes cortas, el cerro estructural y el lomo de falla de la vereda Alto de Los Gómez, la ladera escalonada de la vereda Poblano, un poco del área de los espolones del extremo este, entre otras.

#### **8.1.1.3 Susceptibilidad Baja**

Las zonas de susceptibilidad baja por deslizamientos en el área de estudio, presenta una distribución baja, ocupando 3951,86 ha, que corresponden al 22,06% del total del municipio, se encuentran distribuidas principalmente en los extremos suroeste y sureste del municipio en el corregimiento de Damasco y un poco de la vereda El Buey.

Es importante destacar que los cascos urbanos tanto del municipio como de sus corregimientos, hacen parte de estas zonas de susceptibilidad baja por deslizamientos. Geomorfológicamente corresponde principalmente a las unidades de ambiente denudacional, como por ejemplo las laderas onduladas y las cimas, seguido de algunas unidades estructurales como la ladera escalonada y el escarpe de línea de falla, ubicadas entre el corregimiento de Damasco y la vereda El Buey. Estas zonas están asociadas litológicamente a la Formación Amagá, Combia y los depósitos de vertiente. Respecto a las coberturas terrestres, corresponde esencialmente a los pastos limpios y a los tejidos urbanos.

### **8.1.2 SUSCEPTIBILIDAD POR FLUJOS**

Se estableció para los flujos, como el valor de susceptibilidad alta la clase en la cual se presentaba el 60% de los movimientos, la cual representaba el 15% del área acumulada, como el valor de susceptibilidad media el que representaba el 90% de los movimientos en masa y que estaba alrededor del 35% del área acumulada, por lo tanto solo el 10% de los flujos se ubican en la categoría de susceptibilidad baja (Figura 92).

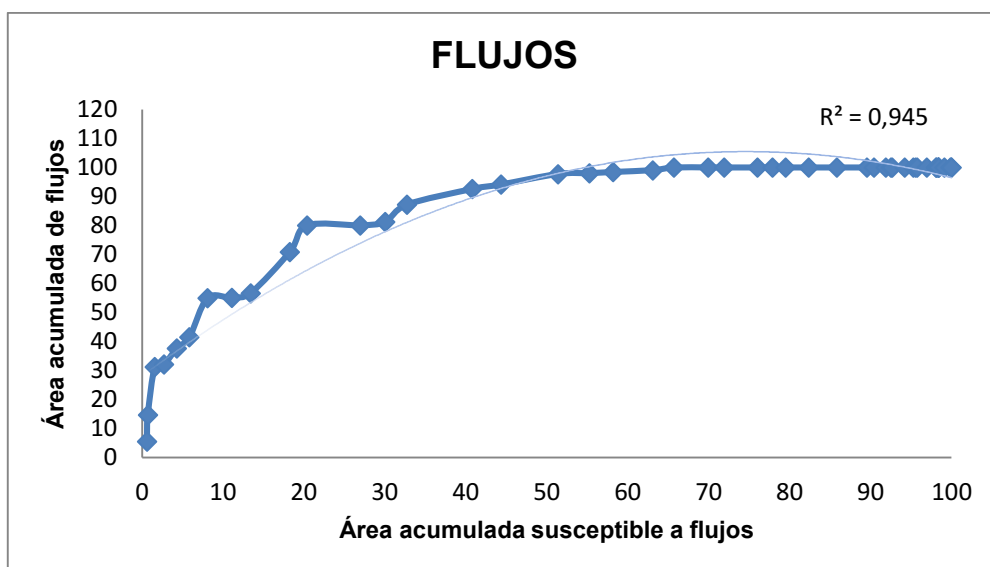


Figura 92. Gráfica de los valores de susceptibilidad para flujos por el método heurístico.

El mapa de susceptibilidad por flujos en Santa Bárbara, según el método heurístico, se categoriza en 3 rangos: Alta, Media y Baja (Figura 93) y el consolidado de las áreas involucradas y el porcentaje en cada categoría se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 9. Descripción susceptibilidad a flujos por el método heurístico.

SUSCEPTIBILIDAD	TOTAL ÁREA (ha)	PORCENTAJE (%)
Alta	2403,12	13,41
Media	3456,30	19,29
Baja	12057,04	67,30

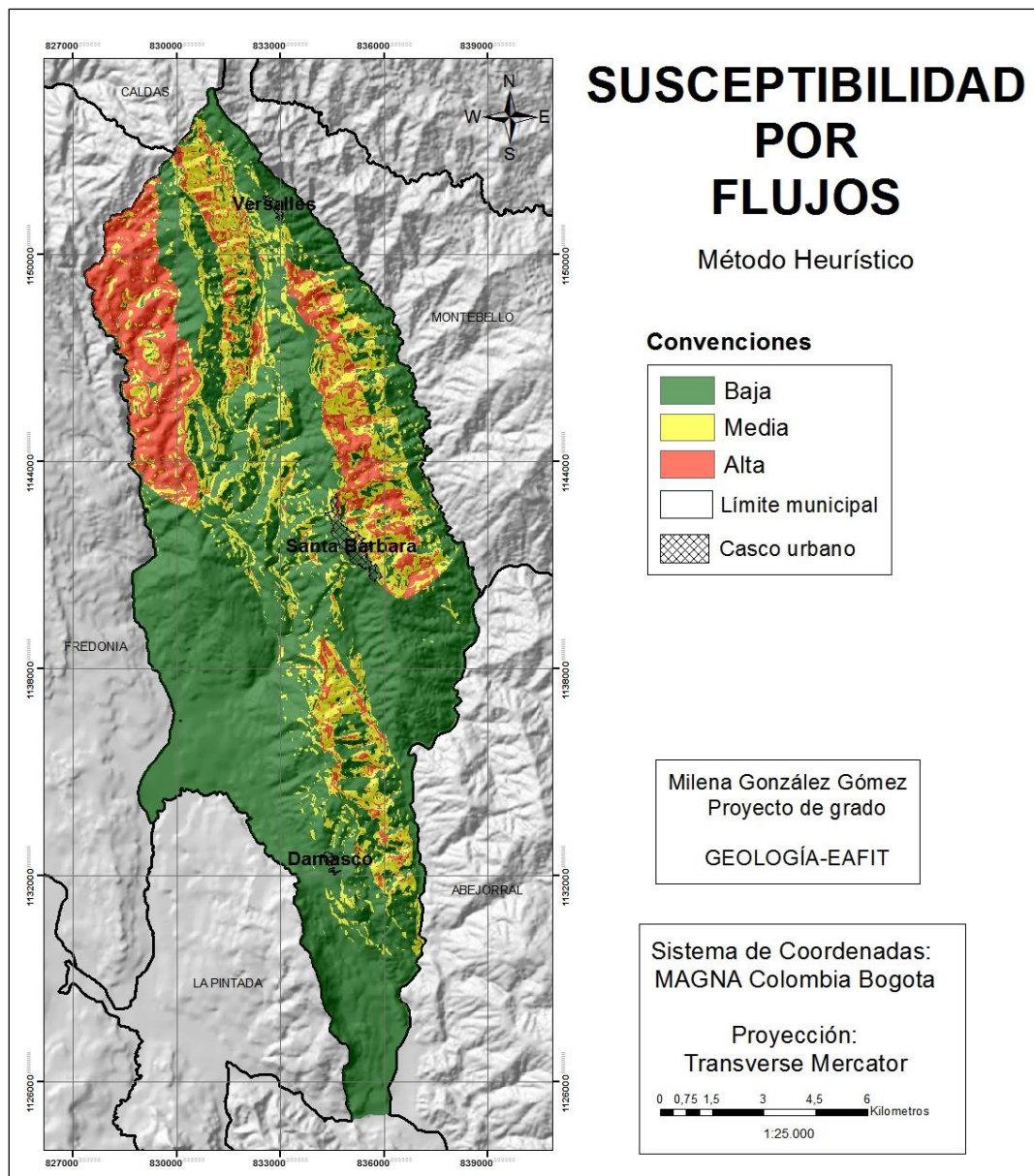


Figura 93. Mapa de susceptibilidad por flujos según el método heurístico, municipio de Santa Bárbara.

#### 8.1.2.1 Susceptibilidad Alta

La susceptibilidad alta por flujos comprende 2403,12 ha, de la zona de estudio, que corresponden al 13,41% del área total y se localiza al norte del municipio (principalmente en el extremo noroeste y en menor medida en el noreste); también se observa al sur del municipio.

Los flujos identificados en estas zonas corresponden a flujos de tierras, pertenecen a las zonas de pendientes fuertes a muy fuertes, geomorfológicamente corresponden a las unidades de ambiente estructural como los espolones festoneados moderados de longitud media y los espolones moderados de longitud media. Se encuentran ubicados

en la cobertura de mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales y de los cultivos confinados. Litológicamente están asociados a la Formación Quebradagrande.

#### **8.1.2.2 Susceptibilidad Media**

La susceptibilidad media por flujos en el municipio de Santa Bárbara presenta una distribución moderada, ocupa una extensión de 3456,30 ha, que corresponde al 19,29% del área total de estudio y su ubicación se da como pequeños polígonos localizados de forma aleatoria en toda la zona de estudio, a excepción de algunos sectores como el suroeste y sur del municipio; y al sureste de la cabecera municipal, principalmente.

Litológicamente este rango cubre principalmente parte de la Formación Quebradagrande y el Neis Intrusivo del Alto de Minas y se encuentra asociado principalmente a las unidades geomorfológicas de ambiente estructural.

#### **8.1.2.3 Susceptibilidad Baja**

En el municipio de Santa Bárbara predomina la susceptibilidad baja por flujos, ocupando una extensión de 12057,04 ha, que corresponden a 67,30% del área total y se encuentra distribuida a lo largo de toda el área de estudio, sin presentar un predominio especial.

Desde el punto de vista geomorfológico se asocia a todos los ambientes de las unidades de la zona de estudio; con un marcado predominio en las unidades de ambiente denudacional como lo son las laderas onduladas y las cimas; y algunas unidades de ambiente estructural como la mesa, las laderas escalonadas, la mayoría de laderas estructurales, el escarpe de línea de falla, los lomos de fallas, los cerros estructurales, entre otras.

Esta zona de susceptibilidad baja ocupa las cabeceras urbanas y está cubierta principalmente por pastos limpios.

### **8.2 SUSCEPTIBILIDAD CON EL MÉTODO ESTADÍSTICO UNIVARIADO**

La susceptibilidad de la zona de estudio por movimientos en masa, según el método estadístico univariado, se generó a partir de los siguientes factores condicionantes, la geología, la geomorfología y la cobertura terrestre. De igual manera, de la morfometría obtenida a partir del DEM, fueron elaborados la rugosidad, las pendientes, la curvatura y el relieve relativo.

Una vez se tenían las diferentes unidades de cada una de las variables condicionantes, se cuantifico el área afectada tanto por deslizamientos como por flujos dividida el área total de la unidad, estos valores fueron sumados y calificados en una escala de 1 a 9 (solo números impares). Se graficaron los porcentajes de área acumulada de los diferentes rangos de susceptibilidad (se subdividió la susceptibilidad en 50 clases)



organizados de mayor a menor, se asignaron los valores de susceptibilidad alta, media y baja, versus el porcentaje acumulado de movimientos en masa y se obtuvo el mapa de susceptibilidad.

### 8.2.1 SUSCEPTIBILIDAD POR DESLIZAMIENTOS

De esta manera, se estableció para los deslizamientos, como el valor de susceptibilidad alta la clase en la cual se presentaba el 60% de los movimientos, la cual representaba el 30% del área acumulada, y como el valor de susceptibilidad media el que representaba el 90% de los movimientos en masa y que estaba alrededor del 70% del área acumulada. Por lo tanto el 10% de los deslizamientos se ubican en la categoría de susceptibilidad baja, dando una muy buena correlación entre el modelo y la realidad del área de estudio analizada (Figura 94).

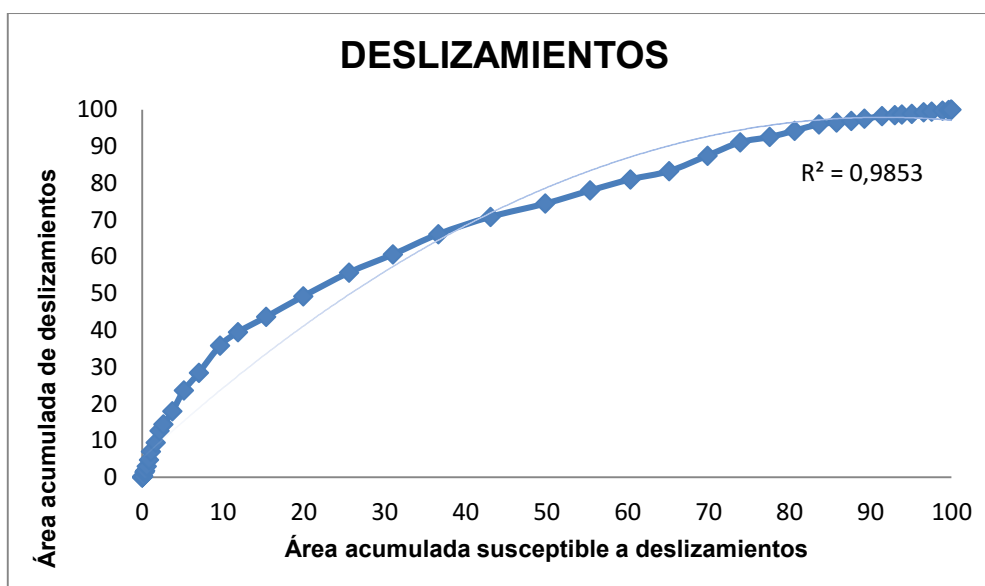


Figura 94. Gráfica de los valores de susceptibilidad para deslizamientos por el método estadístico univariado.

El mapa de susceptibilidad por deslizamientos en Santa Bárbara, según el método estadístico univariado, se categoriza en 3 rangos: Alta, Media y Baja (Figura 95) y el consolidado de las áreas involucradas y el porcentaje en cada categoría se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 10. Descripción susceptibilidad a deslizamientos por el método estadístico univariado.

SUSCEPTIBILIDAD	TOTAL ÁREA (ha)	PORCENTAJE (%)
Alta	5553,14	30,99
Media	7683,45	42,88
Baja	4679,99	26,12

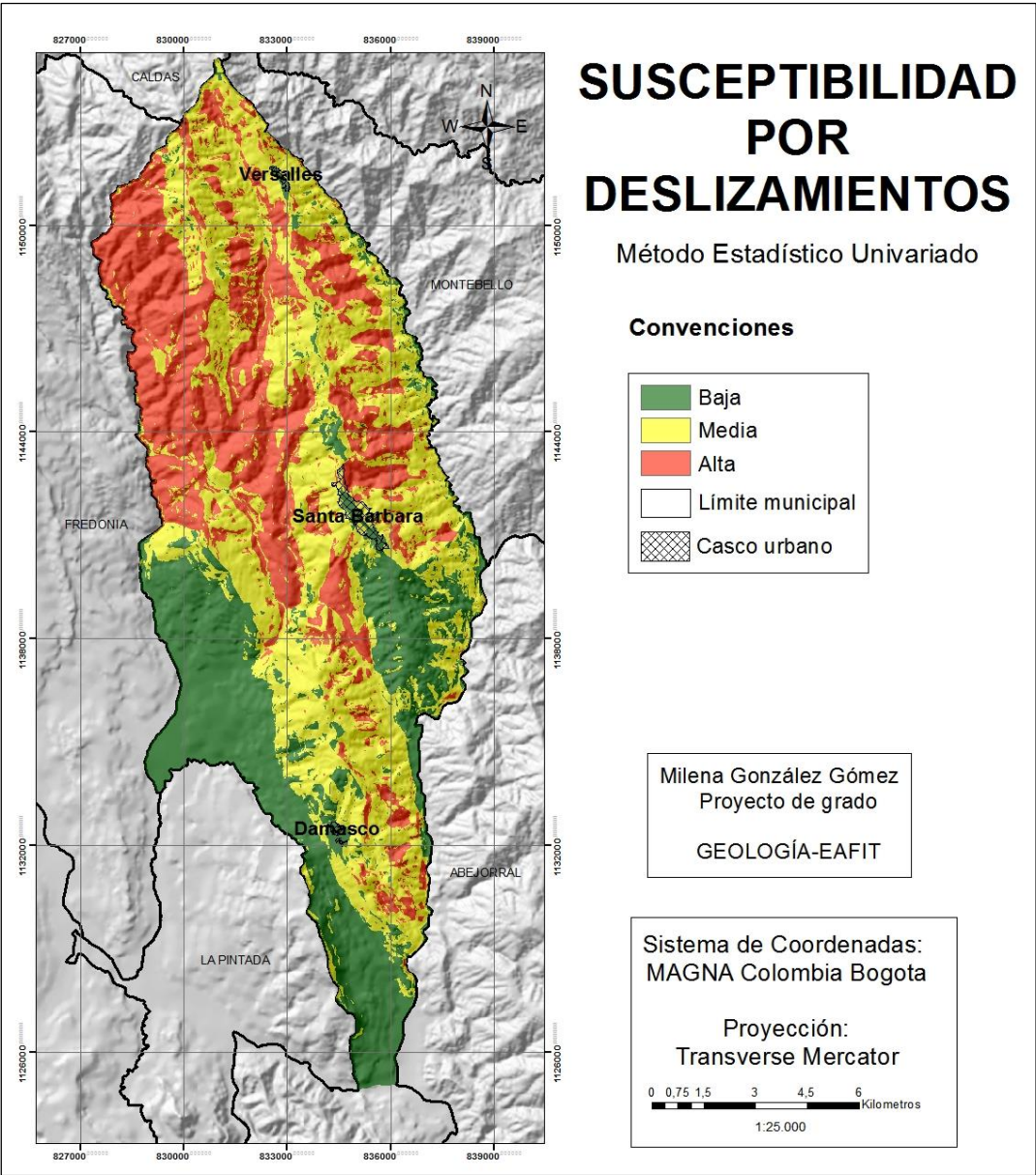


Figura 95. Mapa de susceptibilidad por deslizamientos según el método estadístico univariado, municipio de Santa Bárbara.

#### **8.2.1.1 Susceptibilidad Alta**

La susceptibilidad alta por deslizamientos en el municipio de Santa Bárbara, presenta una distribución moderada, ocupa una extensión de 5553,14 ha, y comprende un 30,99% del área total. Estas zonas se localizan al norte (especialmente al noroeste) del municipio y en menor medida al sur en el corregimiento de Damasco.

Este rango de susceptibilidad corresponde a pendientes fuertes a escarpadas en algunos casos, geomorfológicamente corresponde a unidades de ambiente estructural, asociadas al trazo de la falla Romeral y de Minas, como el espolón festoneado moderado de longitud media; el espolón faceteado bajo de longitud corta, algunas de las laderas estructurales ubicadas al noroeste; los lomos de falla y el gancho de flexión. Se encuentra asociado litológicamente a la Formación Quebradagrande, el Neis Intrusivo de Minas y al Grupo Cajamarca. Respecto a las coberturas terrestres, las zonas de susceptibilidad alta están distribuidas principalmente en el mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, seguido de los cultivos confinados, pastos enmalezados, entre otros.

#### **8.2.1.2 Susceptibilidad Media**

La susceptibilidad media por deslizamientos es poco representativa en el municipio de Santa Bárbara, ocupando una extensión de 7683,45 ha, que corresponden a 42,88% del área total. Se encuentra distribuida principalmente al sur, en el corregimiento de Damasco y en menor medida en el centro y norte del municipio.

Estas zonas de susceptibilidad media se asocian a pendientes moderadas a muy fuertes; geomorfológicamente se encuentran principalmente en las unidades de ambiente estructural, como las laderas estructurales de longitud corta ubicadas al noroeste del municipio, los espolones del noreste, algunas laderas estructurales del centro y sur del municipio, el cerro estructural localizado al sur del corregimiento de Damasco, entre otras.

#### **8.2.1.3 Susceptibilidad Baja**

En el área de estudio las zonas de susceptibilidad baja por deslizamientos ocupan 4679,99 ha, que corresponden al 26,12% del total del Municipio. Se encuentran distribuidas principalmente al sur del Municipio en la vereda Poblano, en el corregimiento de Damasco y en la vereda El Buey; y al sureste del casco urbano de Santa Bárbara, en las veredas Loma de Don Santos y Atanasio.

Geomorfológicamente hace parte de las unidades de ambiente estructural y denudacional, como por ejemplo las laderas escalonadas, la mesa, algunas laderas estructurales y por último las laderas onduladas y cimas; estas zonas están asociadas litológicamente a la Formación Amagá, Combia, los Depósitos de Vertiente y los Gabros.

Es importante destacar que los cascos urbanos tanto del municipio como de sus corregimientos, hacen parte de estas zonas de susceptibilidad baja por deslizamientos. Respecto a las coberturas terrestres, corresponde a los pastos limpios, pastos arbolados, bosque abierto alto, entre otras.

### 8.2.2 SUSCEPTIBILIDAD POR FLUJOS

Se estableció para los flujos, como el valor de susceptibilidad alta la clase en la cual se presentaba el 60% de los movimientos, la cual representaba el 1,5% del área, como el valor de susceptibilidad media el que representaba el 90% de los movimientos en masa y que estaba alrededor del 6% del área acumulada y la categoría de susceptibilidad baja, se ubican en el resto del área (Figura 96).

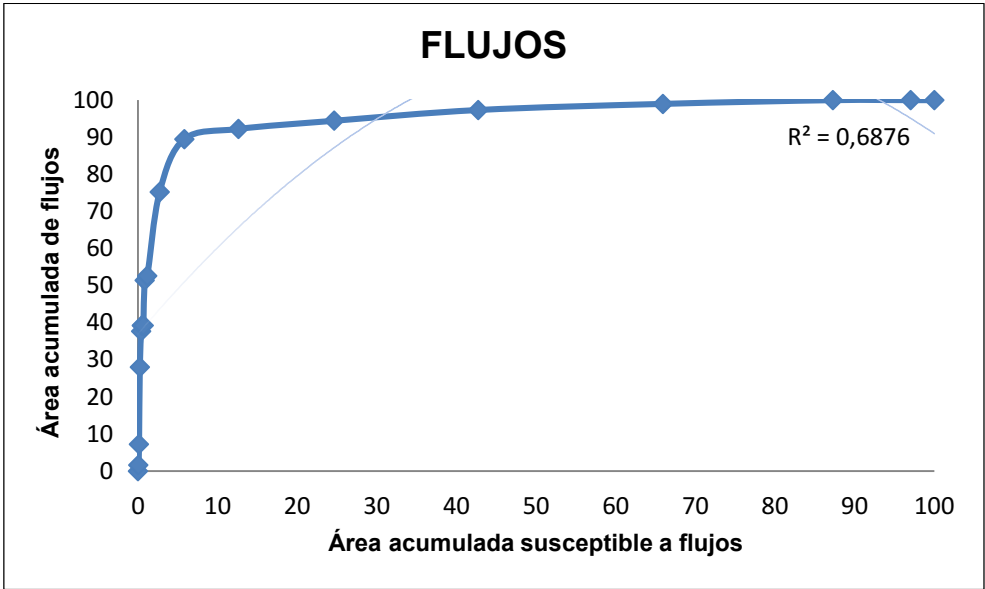


Figura 96. Gráfica de los valores de susceptibilidad para flujos por el método estadístico univariado.

El mapa de susceptibilidad por flujos en Santa Bárbara, según el método estadístico univariado, se categoriza en 3 rangos: Alta, Media y Baja (Figura 97) y el consolidado de las áreas involucradas y el porcentaje en cada categoría se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 11. Descripción susceptibilidad a flujos por el método estadístico univariado.

SUSCEPTIBILIDAD	TOTAL ÁREA (ha)	PORCENTAJE (%)
Alta	208,15	1,16
Media	830,68	4,64
Baja	16876,90	94,20

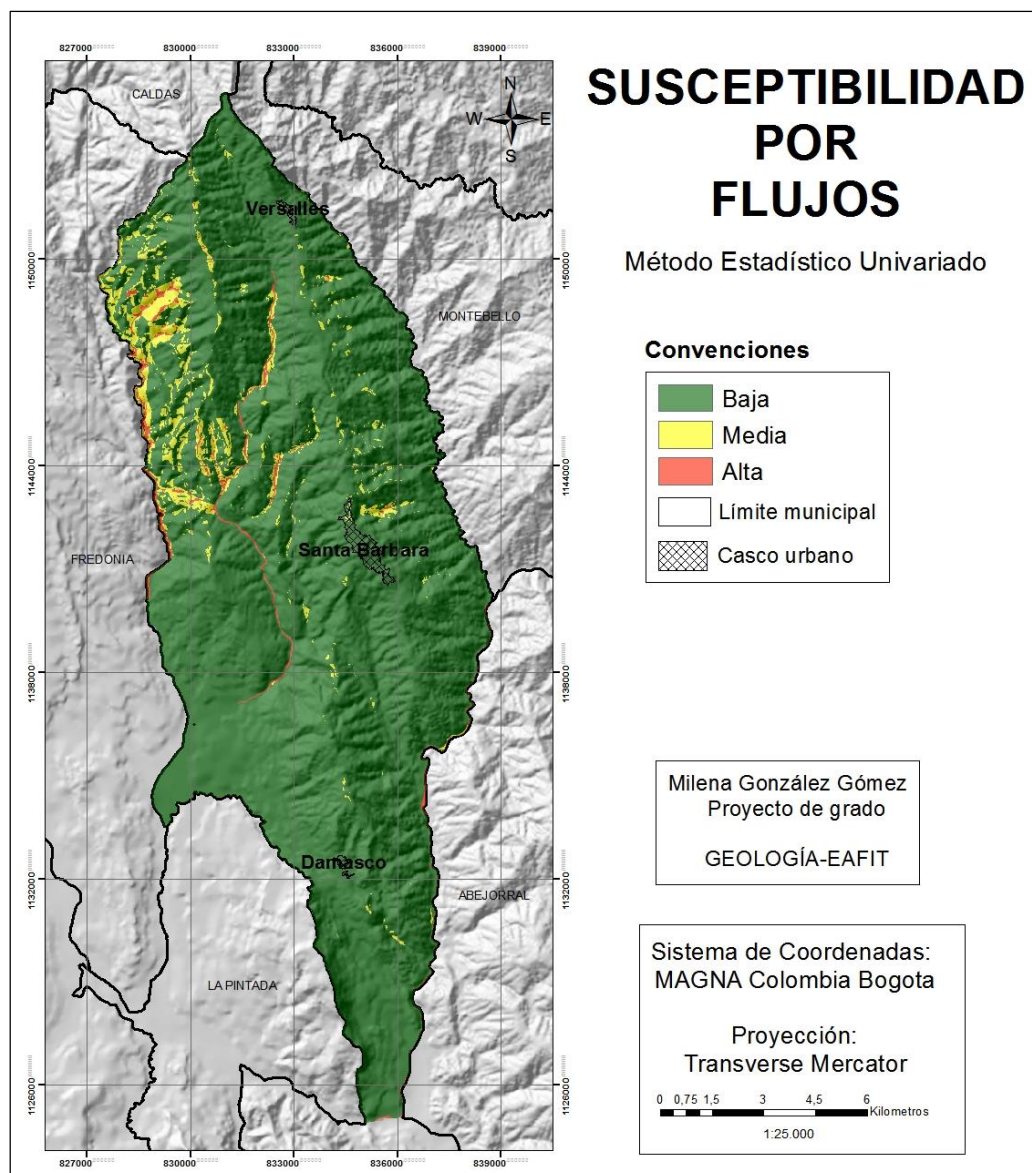


Figura 97. Mapa de susceptibilidad por flujos según el método estadístico univariado, municipio de Santa Bárbara.

### 8.2.2.1 Susceptibilidad Alta

La susceptibilidad alta por flujos en el área de estudio presenta una muy poca distribución, comprende 208,15 ha, de la zona de estudio, que corresponden al 1,16% del área total y se localiza al noroeste del municipio principalmente en los drenajes dobles, ya que éstos flujos se encauzan en los canales principalmente de altas pendientes.

Los flujos identificados en estas zonas corresponden a flujos de tierras, pertenecen a las zonas de pendientes fuertes a muy fuertes y se encuentran ubicados litológicamente en la Formación Quebradagrande. Respecto a las coberturas terrestres, se asocia al mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, los cultivos confinados y a los ríos.

Geomorfológicamente, está representado esencialmente por las unidades de espolón festoneado moderado de longitud media, las laderas de longitud corta (vereda de Las Mercedes) y al cauce aluvial.

#### **8.2.2.2 Susceptibilidad Media**

La susceptibilidad media por flujos en el municipio de Santa Bárbara, presenta una distribución moderada, ocupa una extensión de 830,68 ha, que corresponde al 4,64% del área total de estudio y su distribución se da como pequeños polígonos localizados principalmente al noroeste del Municipio, cerca de las zonas con susceptibilidad alta.

Geológicamente este rango cubre la Formación Quebradagrande y se encuentra asociado a las unidades geomorfológicas de espolón festoneado moderado de longitud media; espolón faceteado bajo de longitud corta; laderas estructurales y cauces aluviales del noroeste del Municipio.

#### **8.2.2.3 Susceptibilidad Baja**

En el municipio de Santa Bárbara predomina la susceptibilidad baja por flujos, ocupando una extensión de 16876,90 ha, que corresponden a 94,20% del área total y se encuentra distribuida a lo largo de toda la zona de estudio.

Es importante destacar que las cabeceras urbanas pertenecen a ésta categoría. Desde el punto de vista geomorfológico se asocia al ambiente estructural y denudacional principalmente, con un marcado predominio en la zona central y sur del Municipio, con unidades como las laderas estructurales, cerros estructurales, lomos de falla, espolones, laderas escalonadas, laderas onduladas, cimas, entre otras.

### **8.3 SUSCEPTIBILIDAD CON EL MÉTODO ESTADÍSTICO BIVARIADO**

Al igual que en la susceptibilidad por los métodos anteriormente descritos, los factores condicionantes en el método estadístico bivariado utilizados fueron la geología, la geomorfología y la cobertura terrestre. También, de la morfometría obtenida a partir del DEM, fueron elaborados la rugosidad, las pendientes, la curvatura y el relieve relativo.

Una vez se tenían las diferentes unidades de cada una de las variables condicionantes, se encontró el valor de  $W_i$  tanto para deslizamientos como para flujos. Se graficaron los porcentajes de área acumulada de los diferentes rangos de susceptibilidad (se subdividió la susceptibilidad en 50 clases) organizados de mayor a menor, se asignaron los valores de susceptibilidad alta, media y baja, versus el porcentaje acumulado de movimientos en masa y se obtuvo el mapa de susceptibilidad por el método estadístico bivariado.



### 8.3.1 SUSCEPTIBILIDAD POR DESLIZAMIENTOS

De esta manera, se estableció para los deslizamientos, como el valor de susceptibilidad alta la clase en la cual se presentaba el 60% de los movimientos, la cual representaba el 23% del área acumulada, y como el valor de susceptibilidad media el que representaba el 90% de los movimientos en masa y que estaba alrededor del 63% del área acumulada. Por lo tanto sólo el 10% de los deslizamientos se ubican en la categoría de susceptibilidad baja, dando una muy buena correlación entre el modelo y la realidad del área de estudio analizada (Figura 98).

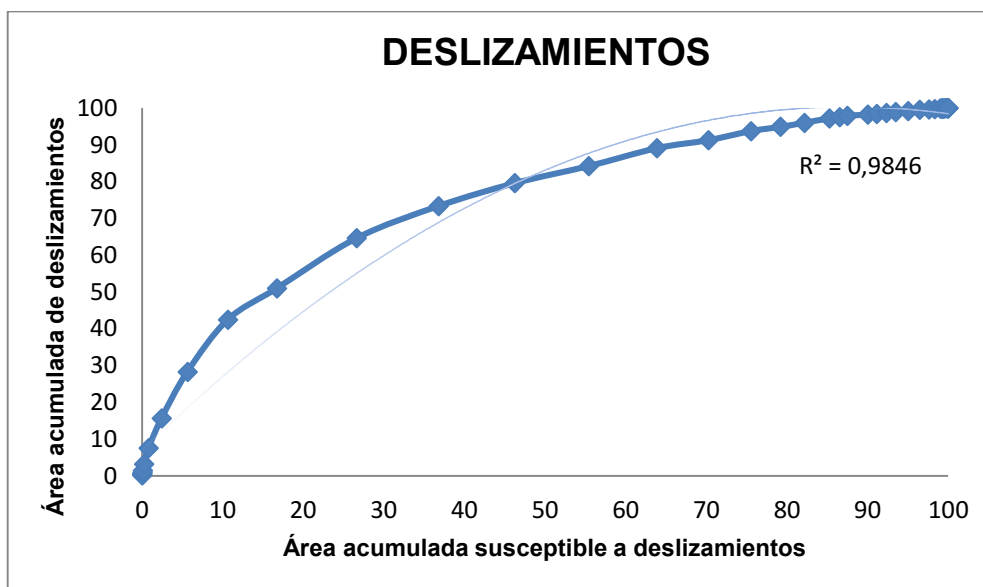


Figura 98. Gráfica de los valores de susceptibilidad para deslizamientos por el método estadístico bivariado.

El mapa de susceptibilidad por deslizamientos en Santa Bárbara, según el método estadístico bivariado, se categoriza en 3 rangos: Alta, Media y Baja (Figura 99) y el consolidado de las áreas involucradas y el porcentaje en cada categoría se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 12. Descripción susceptibilidad a deslizamientos por el método estadístico bivariado.

SUSCEPTIBILIDAD	TOTAL ÁREA (ha)	PORCENTAJE (%)
Alta	4768,04	26,61
Media	8765,04	48,92
Baja	4382,85	24,46

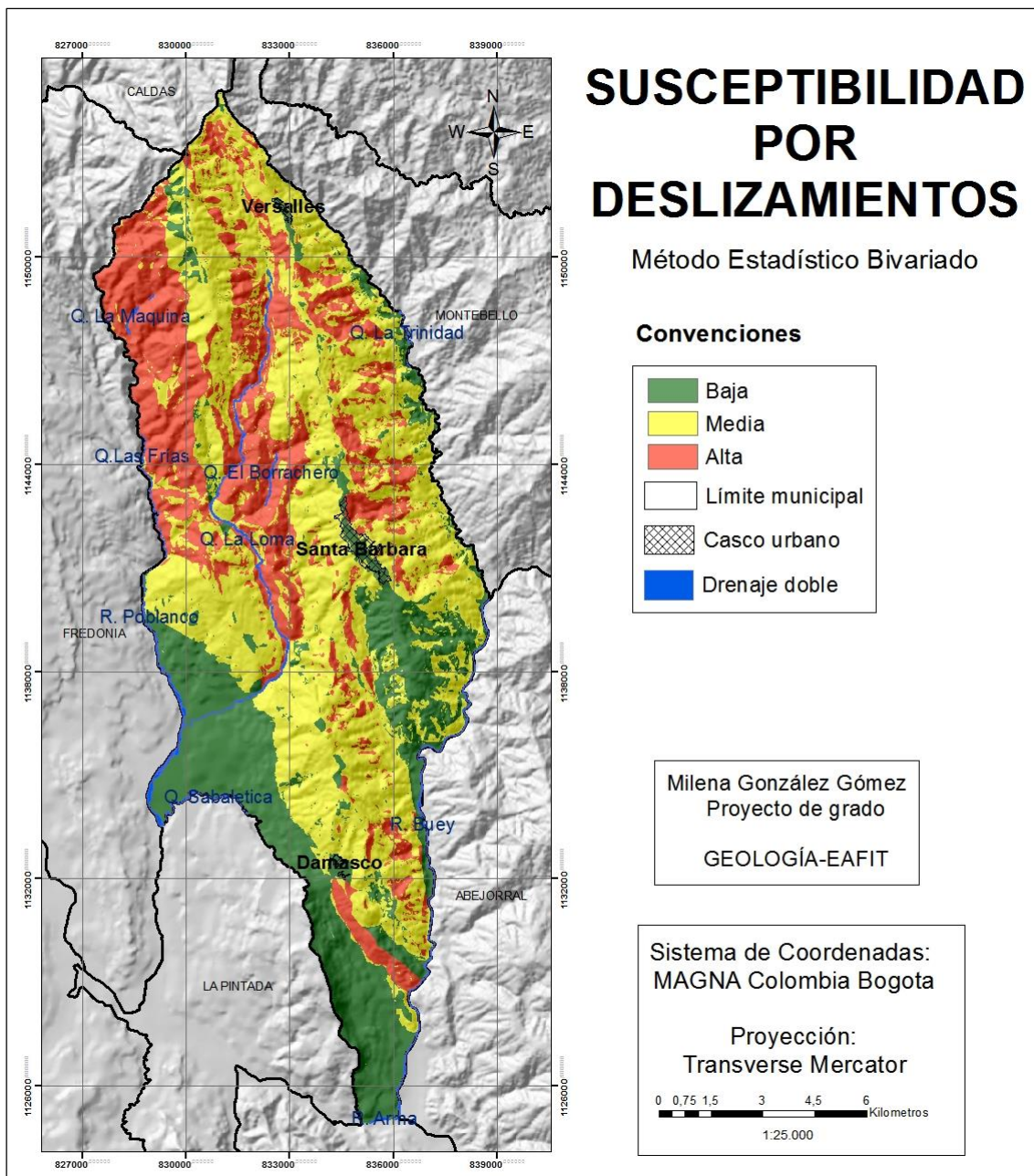


Figura 99. Mapa de susceptibilidad por deslizamientos según el método estadístico bivariado, municipio de Santa Bárbara.

### 8.3.1.1 Susceptibilidad Alta

La susceptibilidad alta por deslizamientos en el municipio de Santa Bárbara, ocupa una extensión de 4768,04 ha, comprendiendo un 26,61% del área total. Estas zonas se localizan al norte del municipio (principalmente al noroeste) y al sur en el corregimiento de Damasco.

Este rango de susceptibilidad corresponde a pendientes fuertes, muy fuertes a escarpadas en algunos casos, se encuentran asociados litológicamente a la Formación Quebradagrande y al Grupo Cajamarca; geomorfológicamente corresponde a unidades

de ambiente estructural como el espolón festoneado moderado de longitud media; espolón faceteado bajo de longitud corta; la ladera estructural de longitudes moderadas (centro y norte del municipio), los lomos de falla, el gancho de flexión, el cerro estructural (norte del municipio) y el espolón moderado de longitud media. Respecto a las coberturas terrestres, las zonas de susceptibilidad alta están distribuidas principalmente en el mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, seguido de los cultivos confinados, pastos enmalezados, entre otros.

#### **8.3.1.2 Susceptibilidad Media**

Para el municipio de Santa Bárbara predomina la susceptibilidad media por deslizamientos, ocupando una extensión de 8765,04 ha, que corresponden a 48,92% del área total y se encuentra distribuida alrededor de todo el municipio, exceptuando los extremos noroeste, suroeste y sureste.

Estas zonas de susceptibilidad media por deslizamientos se asocian a pendientes moderadas a muy fuertes; geomorfológicamente se encuentran en las unidades de ambiente estructural, principalmente en la ladera estructural de longitud moderada (veredas Loma Larga y Corozal), las laderas estructurales de la vereda Poblano y el corregimiento de Damasco, entre otras.

#### **8.3.1.3 Susceptibilidad Baja**

Las zonas de susceptibilidad baja por deslizamientos en el área de estudio ocupan 4382,85 ha, que corresponden al 24,46% del total del municipio y se encuentran distribuidas principalmente al sur del municipio en el corregimiento de Damasco y la vereda El Buey; también se localiza en las veredas Loma de Don Santos, Atanasio, entre otras. Es importante destacar que el tejido urbano tanto continuo como discontinuo, hacen parte de estas zonas de susceptibilidad baja por deslizamientos, de igual manera se encuentra en las coberturas de pastos limpios, mosaico de pastos y cultivos, entre otras.

Desde el punto de vista geomorfológico hace parte de las unidades laderas escalonadas, la mesa, algunas laderas estructurales, el espolón faceteado bajo de longitud media, las laderas onduladas y las terrazas aluviales; estas zonas están asociadas litológicamente a la Formación Amagá, los Gabros y los Depósitos cuaternarios.

### **8.3.2 SUSCEPTIBILIDAD POR FLUJOS**

Se estableció para los flujos, como el valor de susceptibilidad alta la clase en la cual se presentaba el 60% de los movimientos, la cual representaba el 1,10% del área acumulada, como el valor de susceptibilidad media el que representaba el 90% de los movimientos en masa y que estaba alrededor del 7% del área acumulada y por lo tanto

el 10% restante de los flujos se ubican en la categoría de susceptibilidad baja (Figura 100).

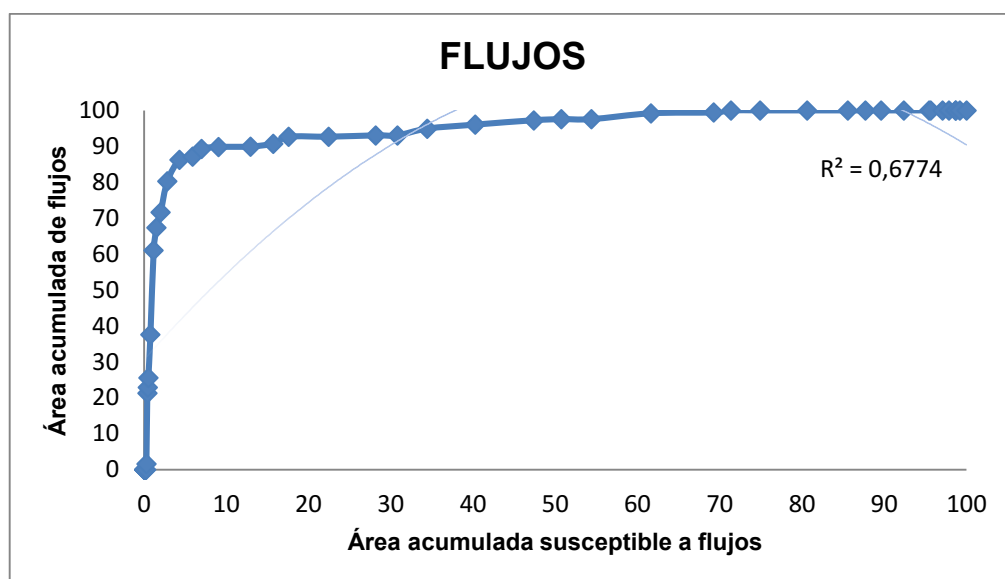


Figura 100. Gráfica de los valores de susceptibilidad para flujos por el método estadístico bivariado.

El mapa de susceptibilidad por flujos en Santa Bárbara, según el método estadístico bivariado, se categoriza en 3 rangos: Alta, Media y Baja (Figura 101) y el consolidado de las áreas involucradas y el porcentaje en cada categoría se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 13. Descripción susceptibilidad a flujos por el método estadístico bivariado.

SUSCEPTIBILIDAD	TOTAL ÁREA (ha)	PORCENTAJE (%)
Alta	206,40	1,15
Media	2602,89	14,53
Baja	15107,09	84,32

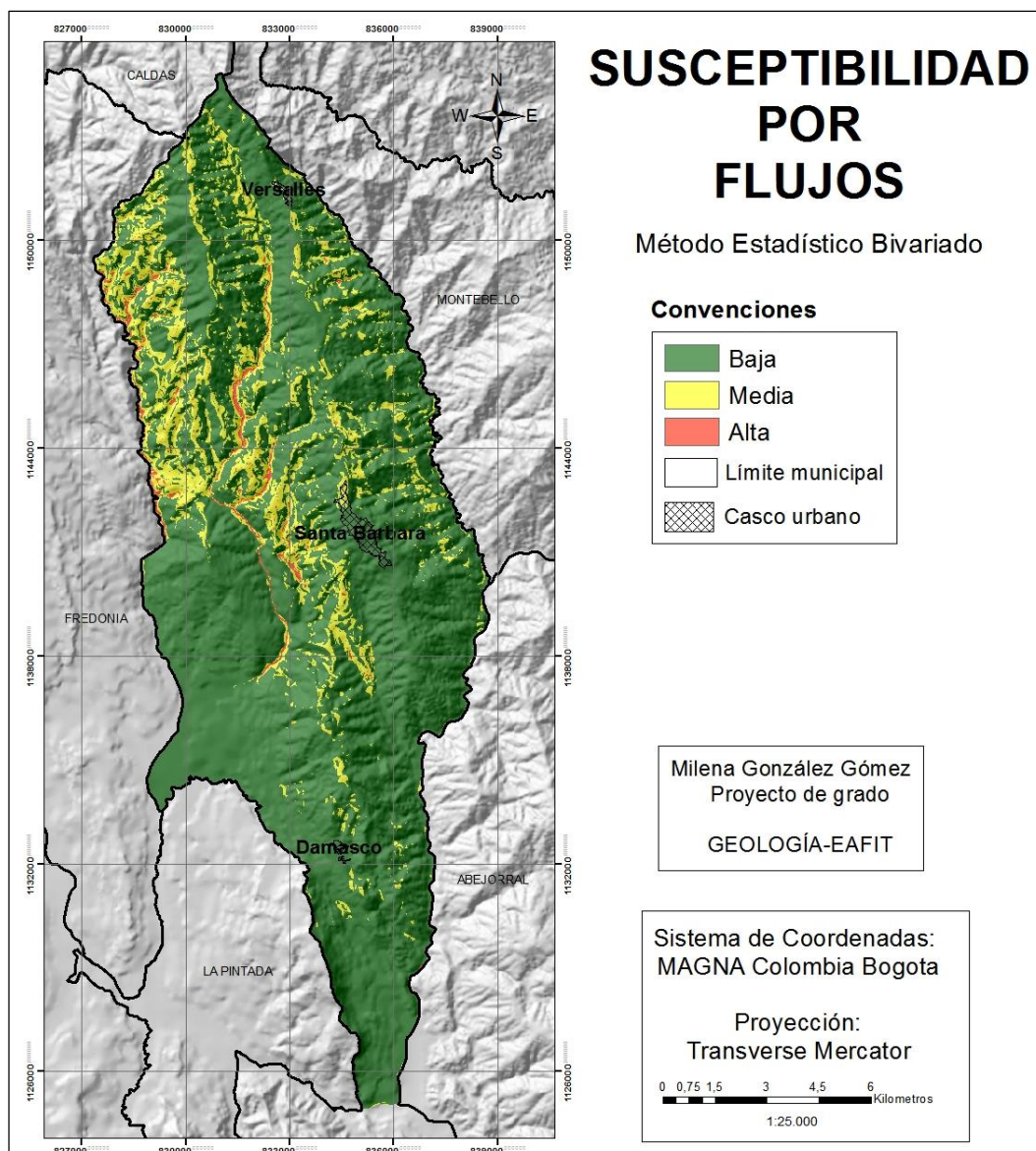


Figura 101. Mapa de susceptibilidad por flujos según el método estadístico bivariado, municipio de Santa Bárbara.

### 8.3.2.1 Susceptibilidad Alta

La susceptibilidad alta por flujos en el área de estudio presenta una distribución baja, comprende 206,40 ha, de la zona de estudio, que corresponden al 1,15% del área total y se localiza en algunos drenajes dobles, ya que son canales activos. Los flujos identificados en estas zonas corresponden a flujos de tierras, pertenecen a las zonas de pendientes fuertes a muy fuertes y se encuentran ubicados en la cobertura de mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, principalmente. Respecto a las unidades geomorfológicas, se encuentra en los cauces aluviales del noroeste del municipio, de igual manera en el espolón festoneado moderado de longitud media; el espolón facetado bajo de longitud corta, lomo de falla corto y cerro estructural de la vereda Alto de Los Gómez.



#### **8.3.2.2 Susceptibilidad Media**

La susceptibilidad media por flujos en el municipio de Santa Bárbara ocupa una extensión de 2602,89 ha, que corresponde al 14,53% del área total de estudio y su distribución se da como pequeños polígonos localizados de forma aleatoria en todo el municipio pero con un mayor predominio hacia el oeste, cerca de las zonas de susceptibilidad alta. Litológicamente este rango cubre principalmente parte de las rocas ígneas y sedimentarias de la Formación Quebradagrande y se encuentra asociado especialmente a las unidades geomorfológicas de ambiente estructural ubicadas al noroeste del municipio, como el espolón festoneado moderado de longitud media; gancho de flexión; espolón faceteado bajo de longitud corta; espolón moderado de longitud media, lomo de falla corto, entre otras.

#### **8.3.2.3 Susceptibilidad Baja**

En el municipio de Santa Bárbara predomina la susceptibilidad baja por flujos, ocupando una extensión de 15107,09 ha, que corresponden a 84,32% del área total y se encuentra distribuida a lo largo de toda la zona de estudio.

Desde el punto de vista geomorfológico se asocia a todos los ambientes de las unidades de la zona de estudio; con un marcado predominio en las unidades de ambiente denudacional como lo son las laderas onduladas del sur del municipio y las cimas; de igual manera algunas unidades de ambiente estructural como las laderas escalonadas; la mesa, el cerro estructural y las laderas estructurales, que predominan en la zona sur del municipio. Esta zona de susceptibilidad baja ocupa principalmente la cobertura de pastos limpios, seguido de los tejidos urbanos tanto continuo como discontinuo, el bosque abierto, entre otras.

## **9. DETONANTES**

Una vez evaluada la susceptibilidad, se pondera la amenaza conservando los pesos de los factores asignados, e integrando además de la susceptibilidad los factores detonantes lluvia y sismo.

### **9.1 DETONANTE LLUVIA**

Los deslizamientos representan el efecto de la lluvia sobre las laderas, y por lo tanto, esta variable debe ser considerada en la modelación de movimientos en masa en la zona de estudio (CORANTIOQUIA-EAFIT, 2015a).

Se ha confirmado que la mayoría de los movimientos en masa que se originan en laderas de zonas montañosas ocurren después de intensas lluvias, lo que hace necesario para cualquier estudio de amenazas por éste tipo de procesos, conocer la cantidad de lluvia para detonarlos, la que se suele llamar lluvia crítica. (INGEOMINAS – CVC, 2001).

En la figura 102, se presentan los campos de precipitación máxima de 24 horas para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años, en la zona de estudio, los cuales son insumos dentro del modelo de predicción de movimientos en masa. Esta información fue suministrada por el proyecto que se está realizando entre CORANTIOQUIA-EAFIT, 2015b.

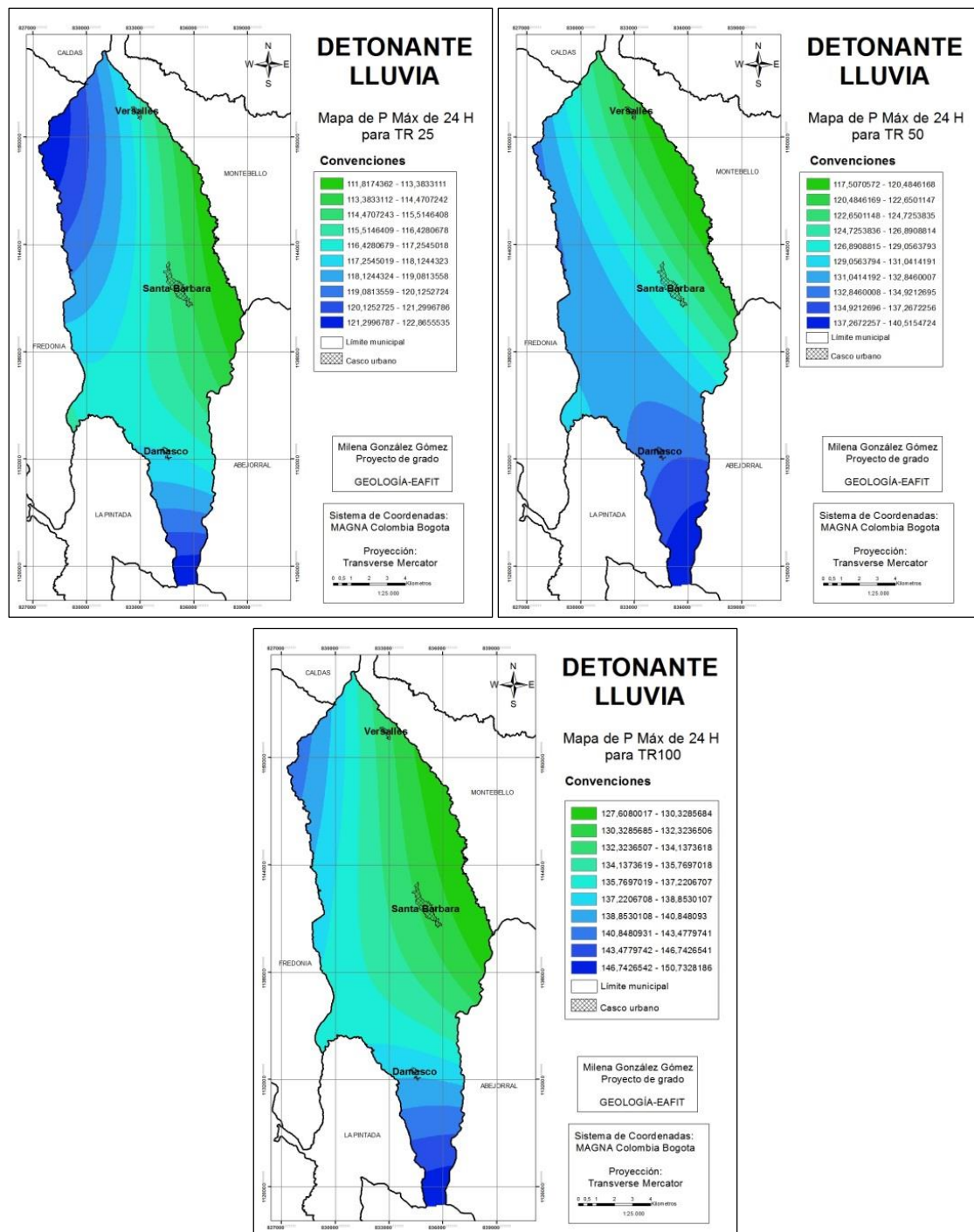


Figura 102. Mapas de precipitación máxima en 24 horas para diferentes periodos de retorno, municipio de Santa Bárbara.

## 9.2 DETONANTE SÍSMO

Desde el punto de vista ingenieril, las laderas y taludes se encuentran en estados que van desde muy estables a marginalmente estables. Cuando un sismo ocurre induce un movimiento del terreno a menudo suficiente para causar fallas a taludes que están marginalmente a moderadamente estables antes del sismo. Los daños resultantes

pueden ser desde insignificantes a catastróficos dependiendo de la geometría y de las características del material que las conforman (SGC, 2013).

El detonante sismo es tomado del Mapa Nacional de Amenaza Sísmica (INGEOMINAS & Universidad Nacional, 2010), que cubre la totalidad del territorio nacional. De esta manera, el cálculo de este detonante se generó a partir de los datos de PGA ( $\text{cm}/\text{seg}^2$ ) correspondientes a un periodo de retorno de 475 años, los cuales fueron rasterizados y categorizados cada 50 gales, permitiendo de esta forma calificar, de forma cualitativa el grado de contribución del sismo a la ocurrencia de movimientos en masa (Tabla 14) (SGC, 2013). En la figura 103 se presenta el mapa del detonante sismo correspondiente al municipio de Santa Bárbara.

Tabla 14. Calificación de los valores de PGA de menor a mayor grado de contribución de la amenaza sísmica a su contribución a los movimientos en masa (Tomado de SGC, 2013).

<b>VALORES DE PGA (<math>\text{cm}/\text{s}^2</math>)</b>	<b>CALIFICACIÓN</b>
< 100	Muy baja
100-150	Baja
150-200	Media
200-300	Alta
> 300	Muy alta

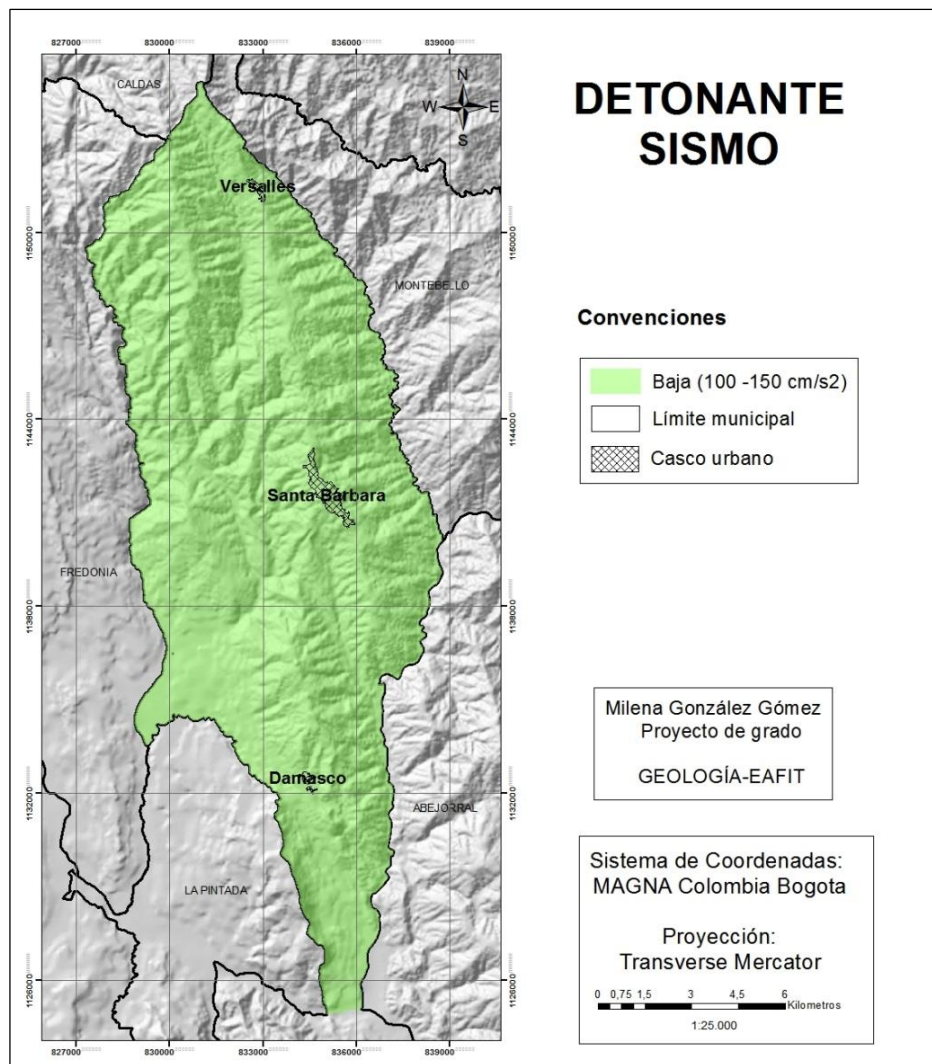


Figura 103. Mapa del detonante sismo para el municipio de Santa Bárbara.

El municipio se caracteriza por presentar un valor bajo y homogéneo para el detonante sismo, en el rango entre 100-150 PGA, el cual se encuentra distribuido uniformemente a lo largo de toda la zona de estudio.



## **10. COMPARACIÓN DE LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS PARA CADA PERÍODO DE RETORNO CON LOS DIFERENTES MÉTODOS DE ZONIFICACIÓN.**

Para la zonificación de la amenaza por movimientos en masa, se debe tener en cuenta una serie de procesos, (generar la susceptibilidad e integrarla con los factores detonantes lluvia y sismo), los cuales han sido anteriormente descritos, que finalmente, generan una secuencia de valores. Estos son graficados en función del porcentaje del área de los movimientos en masa (ya sea deslizamientos o flujos) respecto al área acumulada. Lo anterior, se realizó para cada uno de los períodos de retorno del detonante lluvia ( $Tr=25, 50$  y  $100$  años) y cada uno de los métodos de zonificación, con el objetivo de mostrar entre todos los resultados obtenidos, cuál es el método y con qué período de retorno, se debe realizar la zonificación de la amenaza por movimientos en masa en el municipio de Santa Bárbara y poder establecer las tres categorías de clasificación de la amenaza, las cuales según CORANTIOQUIA - EAFIT. 2015a, los puntos de quiebre para la amenaza son el 60% amenaza alta y el 90% amenaza media.

Posterior a esto se realiza la descripción de la amenaza por movimientos en masa (deslizamientos y flujos) en el municipio de Santa Bárbara, según el método que presenta la categoría de amenaza alta en la menor área acumulada, la cual debe tener un número representativo de eventos.

## 10.1 AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS - $T_r=25$ AÑOS

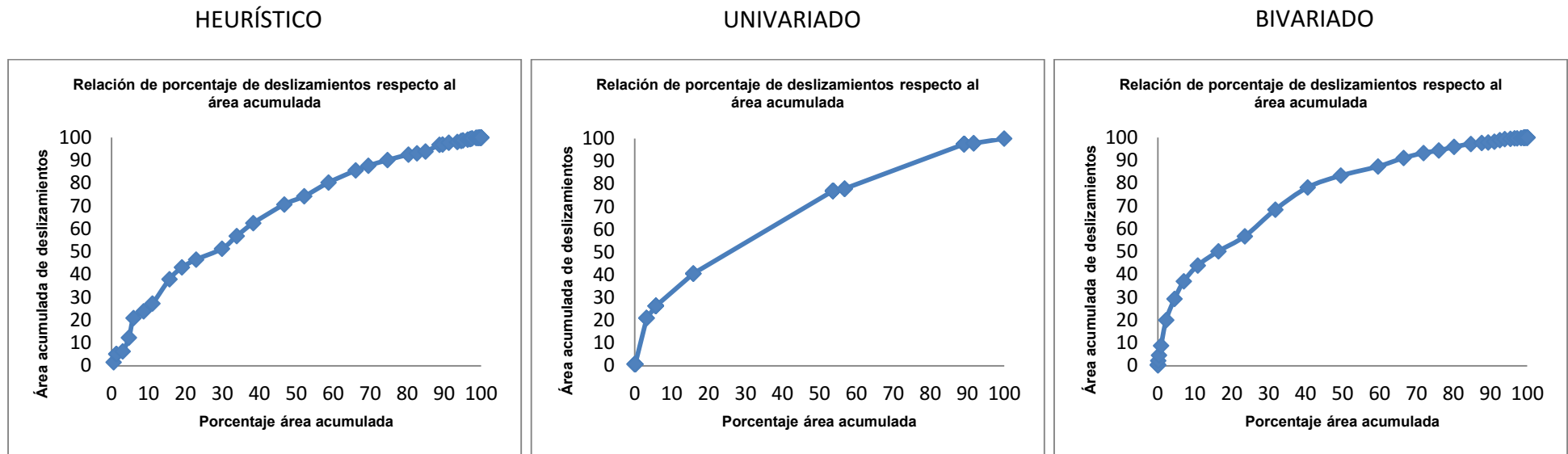


Figura 104. Gráficas de la relación del porcentaje de deslizamientos con respecto al área acumulada, para un  $T_r=25$  años con los diferentes métodos

En la figura 104 se presentan las gráficas de la relación del porcentaje de deslizamientos con respecto al área acumulada, para un  $T_r=25$  años con cada uno de los diferentes métodos, en el municipio de Santa Bárbara. A continuación se describen los rangos de la amenaza para cada uno de éstos métodos:

Según el método heurístico, se establecen para los deslizamientos, como el valor de amenaza alta la clase en la cual se presentaba el 60% de los deslizamientos, la cual representaba el 35% del área acumulada, y como el valor de amenaza media el que representaba el 90% de estos movimientos en masa y que estaba alrededor del 73% del área acumulada. Por lo tanto solo el 10% de los deslizamientos se ubican en la categoría de amenaza baja los cuales corresponden al 27% restante del área.

Según el método estadístico univariado, se establecen para los deslizamientos, como el valor de amenaza alta la clase en la cual se presentaba el 60% de los deslizamientos, la cual representaba el 36% del área, y como el valor de amenaza media el que representaba el 90% de estos movimientos en

masa y que estaba alrededor del 76% de mapa. Por lo tanto solo el 10% de los deslizamientos se ubican en la categoría de amenaza baja los cuales corresponden al 24% restante del área.

Según el método estadístico bivariado, se establecen para los deslizamientos, como el valor de amenaza alta la clase en la cual se presentaba el 60% de los deslizamientos, la cual representaba el 26% del área, y como el valor de amenaza media el que representaba el 90% de estos movimientos en masa y que estaba alrededor del 64% de mapa. Por lo tanto solo el 10% de los deslizamientos se ubican en la categoría de amenaza baja los cuales corresponden al 36% restante del área.

10.2 AMENAZA POR FLUJOS - Tr=25 AÑOS

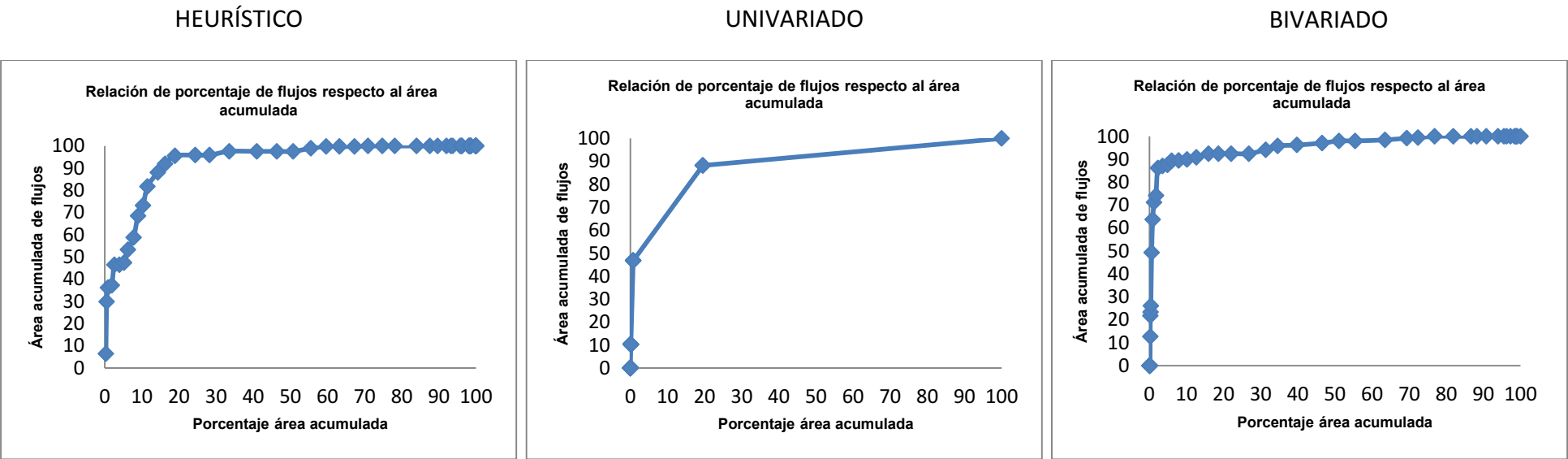


Figura 105. Gráficas de la relación del porcentaje de flujos con respecto al área acumulada, para un Tr=25 años con los diferentes métodos

En la figura 105 se presentan las gráficas de la relación del porcentaje de flujos con respecto al área acumulada, para un  $T_r=25$  años con cada uno de los diferentes métodos, en el municipio de Santa Bárbara. A continuación se describen los rangos de la amenaza para cada uno de éstos métodos:

Según el método heurístico, se establecen para los flujos, como el valor de amenaza alta la clase en la cual se presentaba el 60% de éstos, la cual representaba el 8% del área, y como el valor de amenaza media el que representaba el 90% de los flujos y que estaba alrededor del 15% de mapa. Por lo tanto solo el 10% de los flujos se ubican en la categoría de amenaza baja los cuales corresponden al 85% restante del área.

Según el método estadístico univariado, se establecen para los flujos, como el valor de amenaza alta la clase en la cual se presentaba el 60% de éstos, la cual representaba el 7% del área, y como el valor de amenaza media el que representaba el 90% de los flujos y que estaba alrededor del 27% de mapa. Por lo tanto solo el 10% de los flujos se ubican en la categoría de amenaza baja los cuales corresponden al 73% restante del área.

Según el método estadístico bivariado, se establecen para los flujos, como el valor de amenaza alta la clase en la cual se presentaba el 60% de éstos, la cual representaba el 1% del área, y como el valor de amenaza media el que representaba el 90% de los flujos y que estaba alrededor del 11% de mapa. Por lo tanto solo el 10% de los flujos se ubican en la categoría de amenaza baja los cuales corresponden al 89% restante del área.

### 10.3 AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS - Tr=50 AÑOS

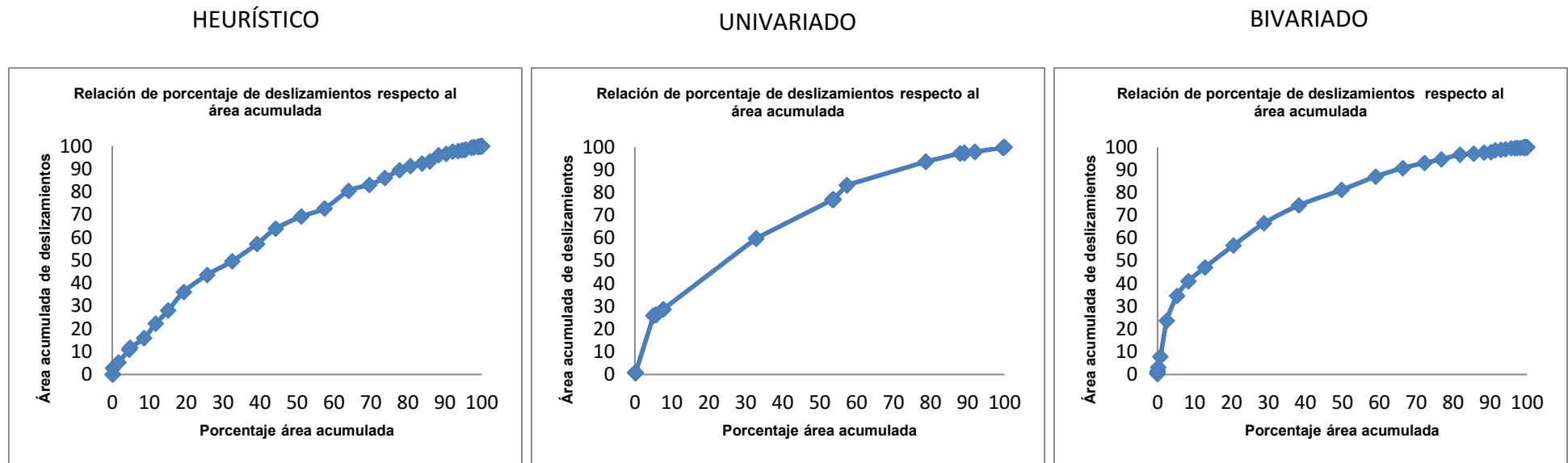


Figura 106. Gráficas de la relación del porcentaje de deslizamientos con respecto al área acumulada, para un Tr=50 años con los diferentes métodos

En la figura 106 se presentan las gráficas de la relación del porcentaje de deslizamientos con respecto al área acumulada, para un Tr=50 años con cada uno de los diferentes métodos, en el municipio de Santa Bárbara. A continuación se describen los rangos de la amenaza para cada uno de éstos métodos:

Según el método heurístico, se establecen para los deslizamientos, como el valor de amenaza alta la clase en la cual se presentaba el 60% de los deslizamientos, la cual representaba el 41% del área, y como el valor de amenaza media el que representaba el 90% de estos movimientos en masa y que estaba alrededor del 78% de mapa. Por lo tanto solo el 10% de los deslizamientos se ubican en la categoría de amenaza baja los cuales corresponden al 22% restante del área.

Según el método estadístico univariado, se establecen para los deslizamientos, como el valor de amenaza alta la clase en la cual se presentaba el 60% de los deslizamientos, la cual representaba el 33% del área, y como el valor de amenaza media el que representaba el 90% de estos movimientos en



masa y que estaba alrededor del 70% de mapa. Por lo tanto solo el 10% de los deslizamientos se ubican en la categoría de amenaza baja los cuales corresponden al 30% restante del área.

Según el método estadístico bivariado, se establecen para los deslizamientos, como el valor de amenaza alta la clase en la cual se presentaba el 60% de los deslizamientos, la cual representaba el 23% del área, y como el valor de amenaza media el que representaba el 90% de estos movimientos en masa y que estaba alrededor del 63% de mapa. Por lo tanto solo el 10% de los deslizamientos se ubican en la categoría de amenaza baja los cuales corresponden al 37% restante del área.

10.4 AMENAZA POR FLUJOS - Tr=50 AÑOS

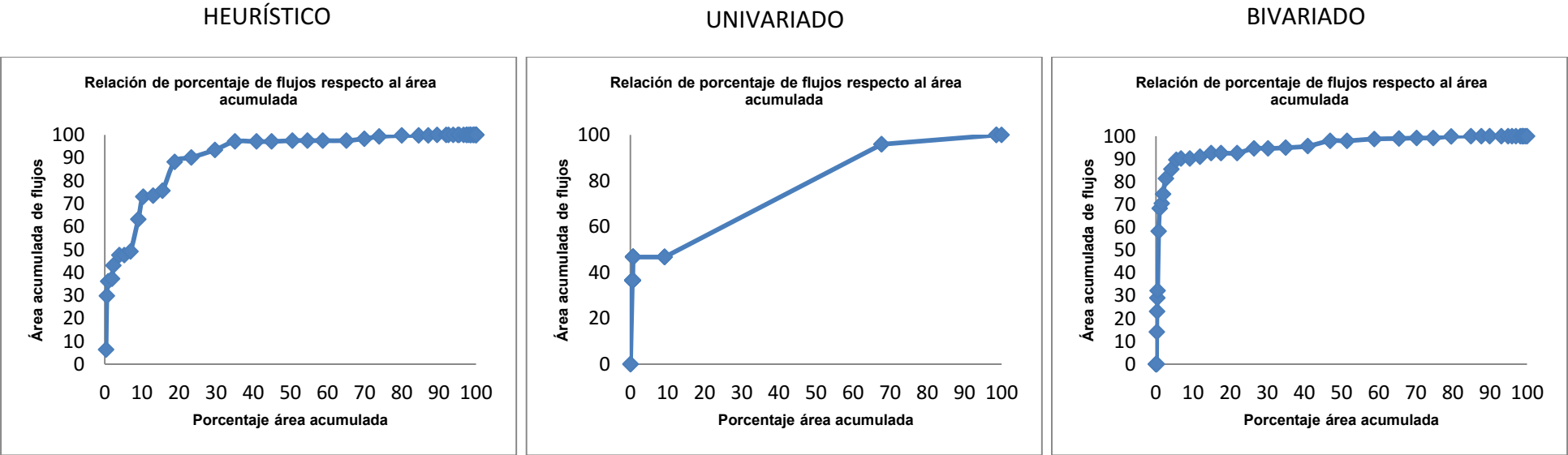


Figura 107. Gráficas de la relación del porcentaje de flujos con respecto al área acumulada, para un Tr=50 años con los diferentes métodos

En la figura 107 se presentan las gráficas de la relación del porcentaje de flujos con respecto al área acumulada, para un  $T_r=50$  años con cada uno de los diferentes métodos, en el municipio de Santa Bárbara. A continuación se describen los rangos de la amenaza para cada uno de éstos métodos:

Según el método heurístico, se establecen para los flujos, como el valor de amenaza alta la clase en la cual se presentaba el 60% de éstos, la cual representaba el 9% del área, y como el valor de amenaza media el que representaba el 90% de los flujos y que estaba alrededor del 22% de mapa. Por lo tanto solo el 10% de los flujos se ubican en la categoría de amenaza baja los cuales corresponden al 78% restante del área.

Según el método estadístico univariado, se establecen para los flujos, como el valor de amenaza alta la clase en la cual se presentaba el 60% de éstos, la cual representaba el 24% del área, y como el valor de amenaza media el que representaba el 90% de los flujos y que estaba alrededor del 61% de mapa. Por lo tanto solo el 10% de los flujos se ubican en la categoría de amenaza baja los cuales corresponden al 39% restante del área.

Según el método estadístico bivariado, se establecen para los flujos, como el valor de amenaza alta la clase en la cual se presentaba el 60% de éstos, la cual representaba el 1% del área, y como el valor de amenaza media el que representaba el 90% de los flujos y que estaba alrededor del 6% de mapa. Por lo tanto solo el 10% de los flujos se ubican en la categoría de amenaza baja los cuales corresponden al 94% restante del área.

## 10.5 AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS - $Tr=100$ AÑOS

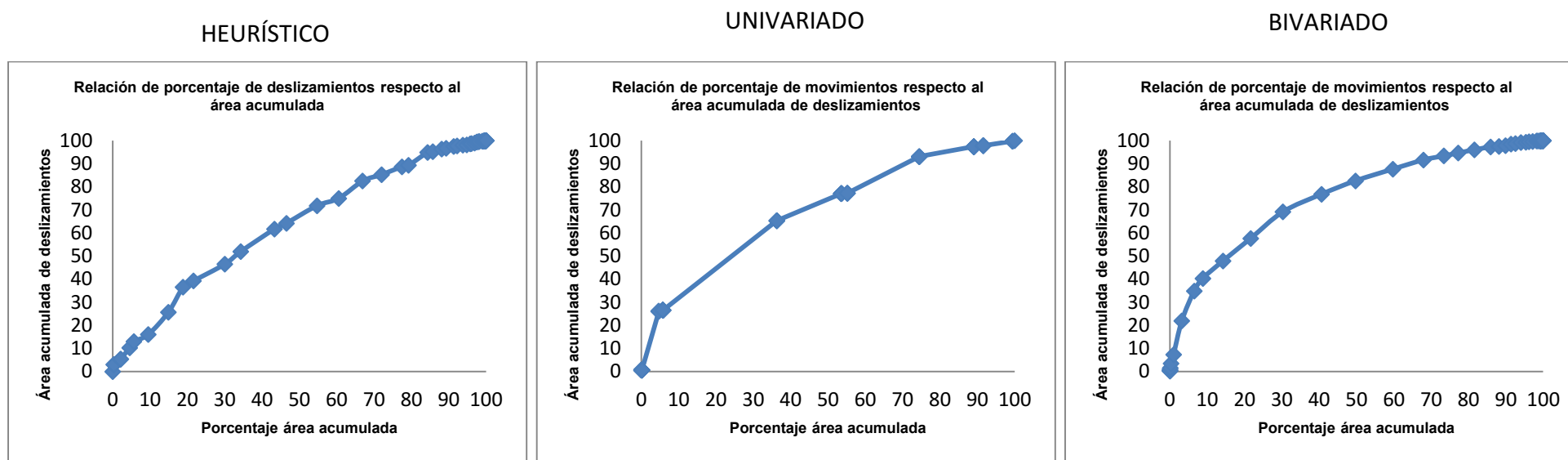


Figura 108. Gráficas de la relación del porcentaje de deslizamientos con respecto al área acumulada, para un  $Tr=100$  años con los diferentes métodos

En la figura 108 se presentan las gráficas de la relación del porcentaje de deslizamientos con respecto al área acumulada, para un  $Tr=100$  años con cada uno de los diferentes métodos, en el municipio de Santa Bárbara. A continuación se describen los rangos de la amenaza para cada uno de éstos métodos:

Según el método heurístico, se establecen para los deslizamientos, como el valor de amenaza alta la clase en la cual se presentaba el 60% de los deslizamientos, la cual representaba el 41% del área, y como el valor de amenaza media el que representaba el 90% de estos movimientos en masa y que estaba alrededor del 80% de mapa. Por lo tanto solo el 10% de los deslizamientos se ubican en la categoría de amenaza baja los cuales corresponden al 20% restante del área.

Según el método estadístico univariado, se establecen para los deslizamientos, como el valor de amenaza alta la clase en la cual se presentaba el 60% de los deslizamientos, la cual representaba el 32% del área, y como el valor de amenaza media el que representaba el 90% de estos movimientos en masa y que estaba alrededor del 71% de mapa. Por lo tanto solo el 10% de los deslizamientos se ubican en la categoría de amenaza baja los cuales corresponden al 29% restante del área.

Según el método estadístico bivariado, se establecen para los deslizamientos, como el valor de amenaza alta la clase en la cual se presentaba el 60% de los deslizamientos, la cual representaba el 23% del área, y como el valor de amenaza media el que representaba el 90% de estos movimientos en masa y que estaba alrededor del 64% de mapa. Por lo tanto solo el 10% de los deslizamientos se ubican en la categoría de amenaza baja los cuales corresponden al 36% restante del área.

## **10.6 AMENAZA POR FLUJOS - TR=100 AÑOS**

HEURÍSTICO

UNIVARIADO

BIVARIADO

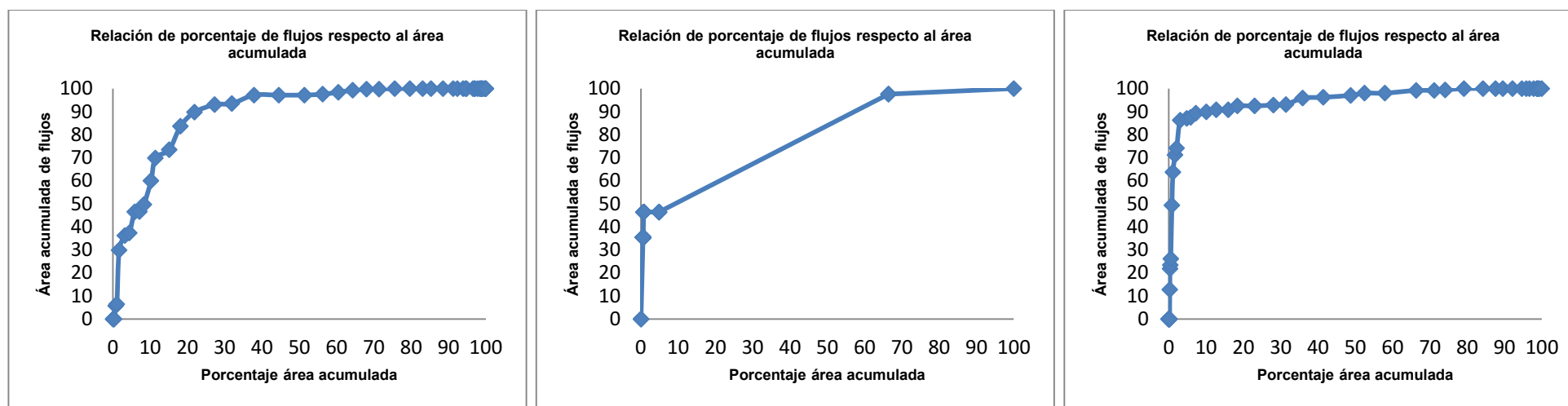


Figura 109. Gráficas de la relación del porcentaje de flujos con respecto al área acumulada, para un  $T_r=100$  años con los diferentes métodos

En la figura 109 se presentan las gráficas de la relación del porcentaje de flujos con respecto al área acumulada, para un  $T_r=100$  años con cada uno de los diferentes métodos, en el municipio de Santa Bárbara. A continuación se describen los rangos de la amenaza para cada uno de éstos métodos:

Según el método heurístico, se establecen para los flujos, como el valor de amenaza alta la clase en la cual se presentaba el 60% de éstos, la cual representaba el 10% del área, y como el valor de amenaza media el que representaba el 90% de los flujos y que estaba alrededor del 22% de mapa. Por lo tanto solo el 10% de los flujos se ubican en la categoría de amenaza baja los cuales corresponden al 78% restante del área.

Según el método estadístico univariado, se establecen para los flujos, como el valor de amenaza alta la clase en la cual se presentaba el 60% de éstos, la cual representaba el 21% del área, y como el valor de amenaza media el que representaba el 90% de los flujos y que estaba alrededor del 57% de mapa. Por lo tanto solo el 10% de los flujos se ubican en la categoría de amenaza baja los cuales corresponden al 43% restante del área.

Según el método estadístico bivariado, se establecen para los flujos, como el valor de amenaza alta la clase en la cual se presentaba el 60% de éstos, la cual representaba el 1% del área, y como el valor de amenaza media el que representaba el 90% de los flujos y que estaba alrededor del 10% de mapa. Por lo tanto solo el 10% de los flujos se ubican en la categoría de amenaza baja los cuales corresponden al 90% restante del área.

A continuación se presentan las tablas resumen con los resultados obtenidos de las gráficas anteriores, donde se muestra según cada período de retorno y cada método, el consolidado de las áreas involucradas para las tres categorías de amenaza.

Tabla 15. Consolidado de las áreas involucradas para las diferentes categorías de amenaza por deslizamientos, según cada período de retorno y método de zonificación.

DESlizAMIENTOS									
Tr= 25 AÑOS				Tr= 50 AÑOS			Tr= 100 AÑOS		
AMENAZA	HEURISTICO	UNIVARIADO	BIVARIADO	HEURISTICO	UNIVARIADO	BIVARIADO	HEURISTICO	UNIVARIADO	BIVARIADO
ALTA (60%)	35%	36%	26%	41%	33%	23%	41%	32%	23%
MEDIA (90%)	73%	76%	64%	78%	70%	63%	80%	71%	64%

Tabla 16 Consolidado de las áreas involucradas para las diferentes categorías de amenaza por flujos, según cada período de retorno y método de zonificación.

FLUJOS									
Tr= 25 AÑOS				Tr= 50 AÑOS			Tr= 100 AÑOS		
AMENAZA	HEURISTICO	UNIVARIADO	BIVARIADO	HEURISTICO	UNIVARIADO	BIVARIADO	HEURISTICO	UNIVARIADO	BIVARIADO
ALTA (60%)	8%	7%	1%	9%	24%	1%	10%	21%	1%
MEDIA (90%)	15%	27%	11%	22%	61%	6%	22%	57%	10%



## 11. ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA CON EL MÉTODO ESTADÍSTICO BIVARIADO

Según el análisis del capítulo anterior, se determinó que para el municipio de Santa Bárbara, el método más ajustado para realizar la zonificación de amenaza por movimientos en masa es el estadístico bivariado, dado a que es éste el que presenta la categoría de amenaza alta en la menor área acumulada, tanto para los deslizamientos como para los flujos.

Para la determinación de la amenaza por el método estadístico bivariado, fueron ponderados los valores  $W_i$  de la susceptibilidad y de los factores detonantes lluvia y sismo.

A detonante lluvia se le da un peso de 20%, ya que en la zona de estudio se presentan fuertes lluvias, por lo tanto es un factor importante como detonante de los movimientos en masa, además porque el detonante sismo no se tiene en cuenta, debido a que al presentar el mismo valor para todo el municipio (bajo: 100-150 PGA), al realizar el  $W_i$  del sismo, éste valor da cero. En la figura 110 se presenta metodología seguida para obtener la amenaza por movimientos en masa.

La ponderación utilizada para la obtención del mapa de amenazas fue la siguiente:

$$AMM = \sum_i^n F_j * W_i$$

Donde,  $F_j$  es la ponderación del factor (Susceptibilidad (80%), detonante lluvia (20%))

$W_i$  es el valor obtenido a partir de la densidad de procesos.

En el caso de la lluvia, fueron probados los diferentes periodos de retorno, encontrando que el  $Tr=50$  años, es el que mejor representatividad lograba de las condiciones observadas en campo y el que estadísticamente concentraba la mayor cantidad de movimientos en la menor área.

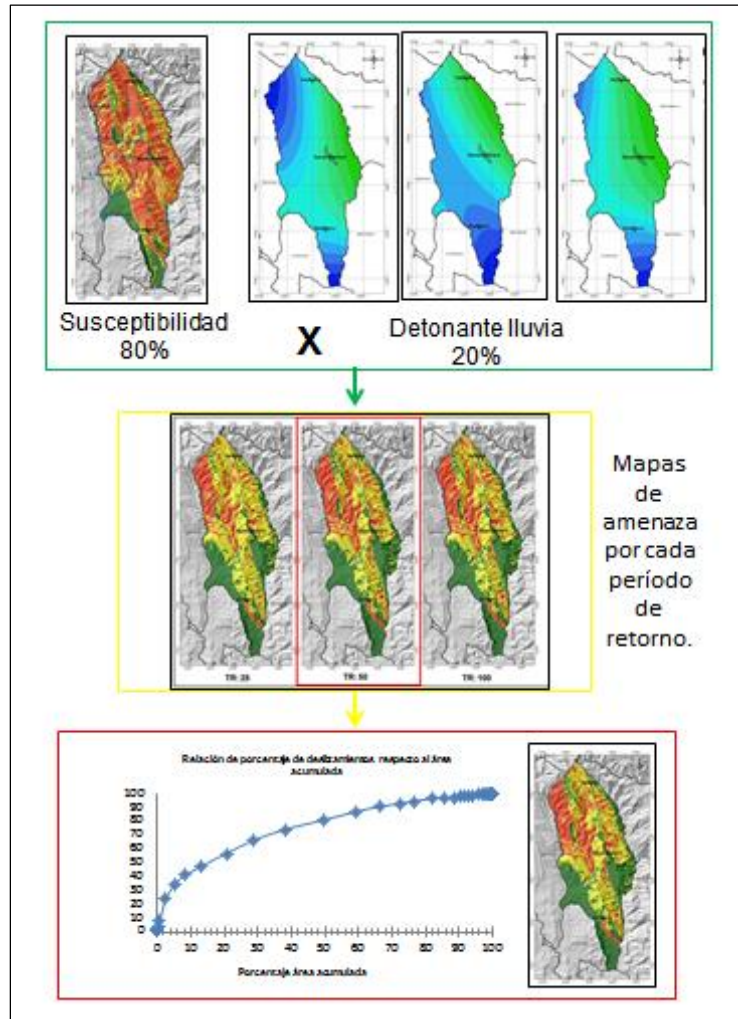


Figura 110. Metodología utilizada en el método estadístico bivariado para obtener la amenaza por movimientos en masa

### 11.1 AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS

El mapa de amenaza por deslizamientos del municipio Santa Bárbara, según el método estadístico bivariado, presenta las tres categorías de amenaza: Alta, Media y Baja (Figura 111) y el consolidado de las áreas involucradas en cada categoría se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 17. Amenaza por deslizamientos, según el método estadístico bivariado.

AMENAZA	TOTAL ÁREA (ha)	PORCENTAJE (%)
Alta	3690,25	23
Media	8205,08	40
Baja	6018,22	37

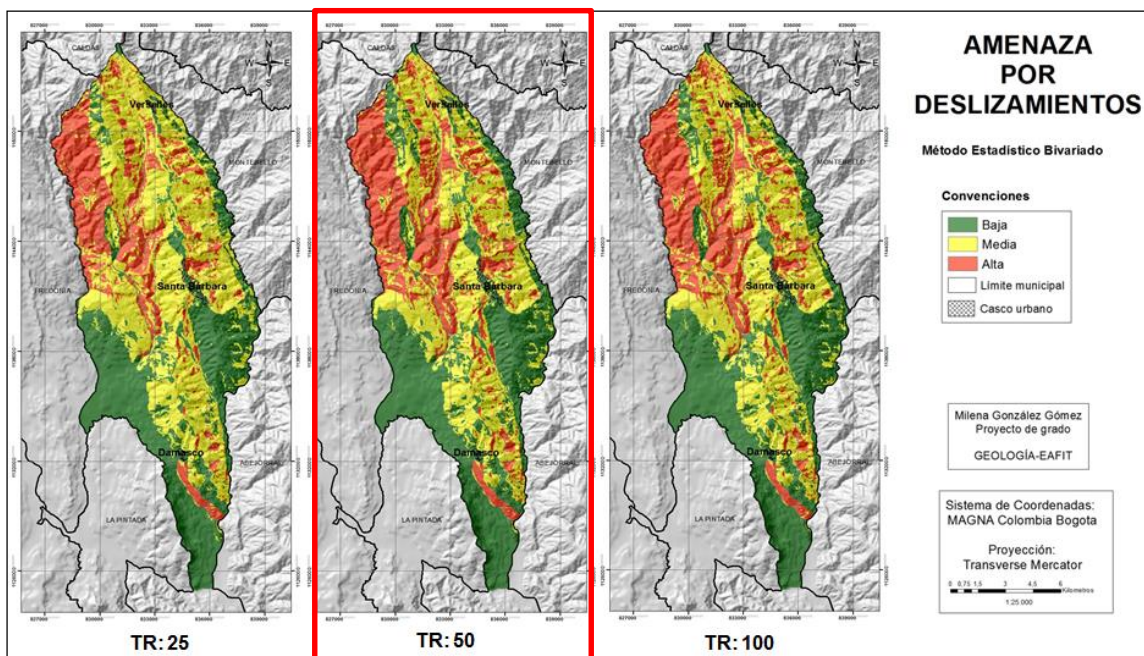


Figura 111. Mapas de amenaza por deslizamientos según el método estadístico bivariado, municipio de Santa Bárbara.

### 11.1.1 Amenaza Alta

La amenaza alta por deslizamientos en el municipio de Santa Bárbara presenta una distribución baja, la cual ocupa el 23% del área total de la zona de estudio. Estas zonas se localizan al norte (especialmente al noroeste); en menor medida en el centro del municipio y al sur en el corregimiento de Damasco. Comprende la cuenca de la quebrada La Máquina, Las Frías, El Borrachero y La Loma. Corresponde principalmente a parte de las veredas La Arcadia, Morroplano, Morroplancho, Las Mercedes, Poblano, Alto de los Gómez, El Vergel,

El Helechal, Pitayo (al noroeste), y al sur del corregimiento de Damasco, la vereda El Buey y La Umbria.

Se puede determinar que para estas zonas lo que condiciona la amenaza corresponde principalmente a la susceptibilidad; seguido de las condiciones de lluvia que presentan rangos altos y muy variables (entre 122-132 mm/día).

Se destaca que los deslizamientos identificados corresponden principalmente a deslizamientos de subtipo traslacionales y rotacionales, así como flujos de tierra. También hay presencia de algunos procesos erosivos, por lo tanto es importante resaltar que aunque no toda el área está afectada por procesos de inestabilidad activos actualmente; por las condiciones propias del terreno, la posibilidad de generación de nuevos movimientos en masa es alta.

#### **11.1.2 Amenaza Media**

En el municipio de Santa Bárbara predomina la amenaza media por deslizamientos, ocupando un 40% del total del área de estudio, la cual se encuentra distribuida alrededor de todo el municipio sin presentar un predominio especial; exceptuando los extremos noroeste, suroeste y sureste del municipio, al igual que la zona al sureste de la cabecera urbana de Santa Bárbara.

En general, está asociada a la categoría de susceptibilidad media y alta. En esta categoría de amenaza se tienen valores de lluvia de 119 y 133 mm/día. Los movimientos en masa que se identifican son principalmente deslizamientos traslacionales.

#### **11.1.3 Amenaza Baja**

La categoría de amenaza baja por deslizamientos presenta una distribución moderada, ocupando el 37% del total del municipio, se encuentra distribuida principalmente en los extremos suroeste y sureste, al igual que al sur y sureste del casco urbano de Santa Bárbara y de igual manera en las cimas donde están ubicados los cabeceras urbanas. Con un predominio hacia el corregimiento de Damasco, en las cuencas del río Poblano, las quebradas Sabaleticas, La Loma, La Trinidad, el río Arma y la parte baja de la cuenca del río El Buey.

Esta categoría corresponde a los valores de lluvia que oscilan entre 117 y 127 mm/día. Se identifica que la amenaza baja está controlada por la variable susceptibilidad baja y en menor medida media por la lluvia. Eventualmente se presentan movimientos en masa.

## 11.2 AMENAZA POR FLUJOS

El mapa de amenaza por flujos del municipio Santa Bárbara, según el método estadístico bivariado, presenta las tres categorías de amenaza: Alta, Media y Baja (Figura 112) y el consolidado de las áreas involucradas en cada categoría se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 18. Amenaza por flujos, según el método estadístico bivariado.

AMENAZA	TOTAL ÁREA (ha)	PORCENTAJE (%)
Alta	136,76	1
Media	1072,08	6
Baja	16701,66	93

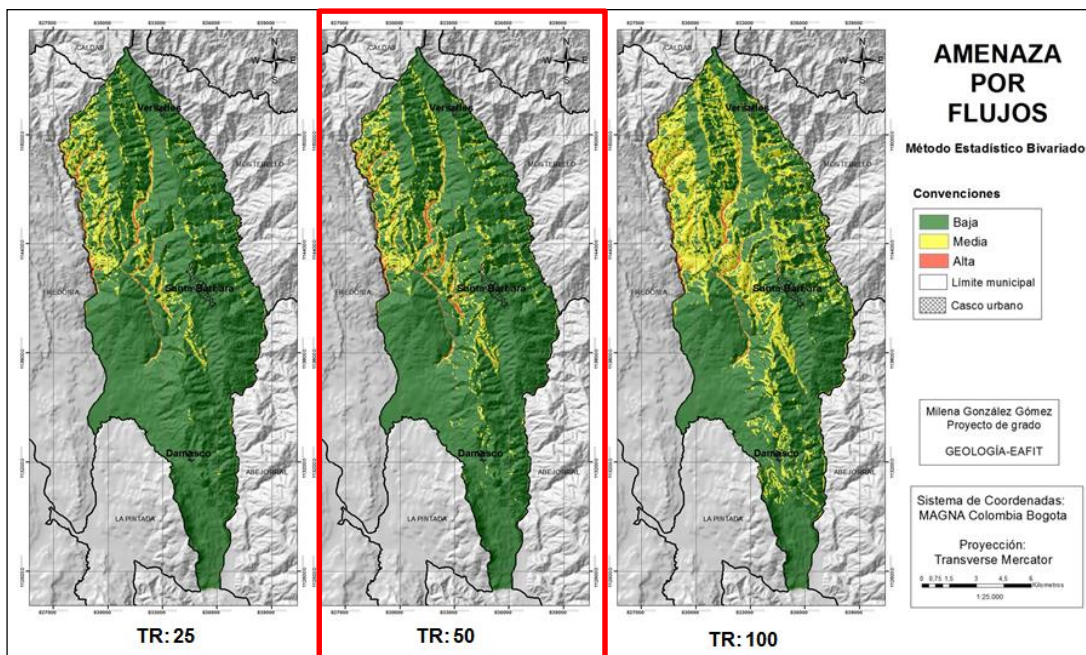


Figura 112. Mapas de amenaza por flujos según el método estadístico bivariado, municipio de Santa Bárbara.

### **11.2.1 Amenaza Alta**

La amenaza alta por flujos en el municipio de Santa Bárbara, presenta poca representación, ocupando el 1% del total del área. Se localiza principalmente al noroeste del municipio, asociada a la cuenca de la quebrada La Máquina, Las Frías, La Loma y el Borrachero. Corresponde a las veredas La Arcadia, Morroplano, Morroplancho, Las Mercedes y una pequeña parte al norte de la vereda Poblano.

Se puede determinar que esta categoría es controlada principalmente por los valores de susceptibilidad alta, seguido del detonante climático que presenta variaciones significativas debido a que predominan valores de lluvia entre 127-132 mm/día.

### **11.2.2 Amenaza Media**

La amenaza media por flujos en el área de estudio, presenta una distribución media, con un 6% del total del municipio y su ubicación se da como pequeños polígonos localizados de forma aleatoria, al noroeste del Municipio, cerca de las zonas con amenaza alta. Comprende principalmente las veredas Pitayo, La Arcadia, Morroplano, Morroplancho, Las Mercedes, Alto de los Gómez, El Helechal, Loma Larga, Corozal, El Vergel, Guamito y una pequeña parte al norte de la vereda Poblano.

En general, la amenaza media por flujos, está asociada a la susceptibilidad media y alta. En esta categoría de amenaza se tienen valores de lluvia de 119-133 mm/día. Se identifica por lo tanto que la amenaza media está controlada por la variable susceptibilidad esencialmente, seguido del detonante lluvia que presenta un rango de valores muy amplio.

### **11.2.3 Amenaza Baja**

En el municipio de Santa Bárbara, predomina la categoría de amenaza baja por flujos, ocupando el 93% del total del municipio, se encuentra distribuida a lo largo de toda el área de estudio, sin presentar un predominio especial.

Es importante destacar que los cascos urbanos del municipio y sus corregimientos, se encuentran ubicados en las zonas de amenaza baja por flujos. Dado a que ocupa la mayor parte de la zona de estudio, ésta categoría corresponde a valores de lluvia que oscilan entre 117 y 140 mm/día; por lo tanto se encuentra asociada principalmente a los valores de susceptibilidad baja.



## 12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El mapa de zonificación de amenaza por movimientos en masa se realizó con el método estadístico bivariado (con un  $T_r = 50$  años), el cual muestra una mayor concentración de los valores de amenaza alta entorno a los eventos, generando que estas zonas tengan una mejor precisión. Por lo tanto, este método tiene una mayor relación con la realidad de la zona de estudio, ya que en menor área acumulada de amenaza se encuentra un mayor porcentaje de movimientos en masa.
- El método estadístico bivariado con un  $T_r = 50$  años, presenta para la categoría de amenaza alta un 23% del área acumulada, el método estadístico univariado un 33% del área acumulada y por último el método heurístico un 41% del área acumulada.
- El método estadístico univariado fue el segundo en presentar los valores para la categoría de amenaza alta en la menor área acumulada. Este método combina procesos cuantitativos y cualitativos, pues mide el área afectada tanto por deslizamientos como por flujos dividida entre el área total de cada unidad y divide los valores de susceptibilidad, y los detonantes lluvia y sismo en 5 rangos para darles una calificación con números de 1 a 9, puede ser por esta razón que no presenta resultados tan congruentes con la realidad de la zona de estudio. En las gráficas donde se presenta la relación entre el porcentaje del área de los movimientos en masa (ya sea deslizamientos o flujos) respecto al área acumulada, se puede observar que presentan amplios rangos con igual número de valores por lo que se tienen como pequeños “descansos” (principalmente para los flujos).
- Como se planteó en la hipótesis de este proyecto, la propuesta de realizar una comparación en la metodología utilizada para la zonificación de amenazas por movimientos en masa, surgió debido a que la gran mayoría de éste tipo de trabajos son realizados con el método heurístico, por lo tanto se esperaba que los resultados de éste fueran los que mas semejanza tuvieran con la realidad de la zona de estudio; sin embargo fue el método que dio como resultados los valores para la categoría de amenaza alta en el mayor porcentaje de área acumulada. Esto puede ser debido a la dependencia de este método de la experticia de quien realiza la evaluación y califica las variables, por ésta razón este es mucho mas subjetivo y genera mas incertidumbre. Por lo tanto, no se obtendrían los mismos resultados si se trabajara en la misma zona, con la mismas variables por dos personas distintas.

- Según el método estadístico bivariado, el mapa de amenaza por deslizamientos, se encuentra representado por un 23% del municipio en amenaza alta, el 40% en amenaza media y el 37% en amenaza baja. Y para el mapa de amenaza por flujos se tiene que el 1% del municipio tiene amenaza alta, el 6% amenaza media y el 93% amenaza baja.
- El detonante sismo no sirve para comparar o ser utilizado en el método estadístico bivariado, debido a que por su valor homogéneo en toda la zona de estudio, al realizar el  $W_i$  del sismo, este valor da como resultado cero, por lo tanto este detonante no aporta en la discriminación de la zonificación de la amenaza; sin embargo en los otros dos métodos restantes si se utilizó su calificación (3, debido a que presenta valores bajos); aunque obviamente no generó ningún cambio crucial o importante en la zonificación de la amenaza por movimientos en masa.
- En cuanto a la información bibliográfica secundaria utilizada para el desarrollo de éste proyecto, se tuvo en cuenta el inventario de movimientos en masa tomado de la base de datos SIMMA, ya que esta se pudo georreferenciar y usar en el trabajo de campo, para la verificación e identificación de los procesos allí descritos.
- En el municipio de Santa Bárbara, afloran una secuencia de rocas, variables en edad entre Paleozoico hasta Cuaternario. Para la identificación de estas unidades se tomaron en cuenta trabajos anteriores, realizados en la zona de estudio, en materias como rocas sedimentarias, estratigrafía y/o campo II.
- La identificación y descripción de los procesos morfodinámicos del municipio de Santa Bárbara, se realizó principalmente por medio de las ortofotos y la verificación del trabajo de campo, así como el uso de Google earth, en zonas donde las ortofotografías no presentaban buena resolución y/o eran de difícil acceso en campo.
- Se trabajo de manera separada la zonificación de la amenaza según deslizamientos y flujos, para todos los métodos, debido a que al presentarse flujos de tierra en menor cantidad comparados con los deslizamientos, no se quiso despreciar su importancia en el modelo. Además de esta manera, se obtuvieron resultados muy acordes con la realidad para los flujos identificados.
- Las principales variables que condicionan los movimientos en masa y los procesos erosivos, para el municipio de Santa Bárbara, son las zonas de alta pendiente, el control

estructural, las altas precipitaciones, la deforestación, el crecimiento de ganadería extensiva, etc; los cuales no son solo condicionantes naturales de la zona de estudio; sino que por el contrario se observa el fuerte control que tiene el hombre, sobre el modelado del terreno.

- El municipio de Santa Bárbara, presenta un marco estructural muy complejo, ya que está asociado al trazo de importantes fallas y de varios lineamientos paralelos y perpendiculares a éstas, lo cual evidencia un fuerte control tectónico en la zona. Por ésta razón se recomienda incluir en el modelo de zonificación de amenazas, parámetros de tipo estructural, como por ejemplo la densidad de fracturamiento de la roca, la resistencia, entre otras.
- La cobertura terrestre es un factor determinante para la protección de los suelos, un suelo descubierto, desprovisto de vegetación y con cultivos transitorios está propenso a movimientos de masa por la desfavorabilidad de los cultivos y la carencia de vegetación. Las zonas de amenaza alta y media por movimientos en masa, están cubiertas en su mayoría por mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales; pastos enmalezados y cultivos confinados. Lo que indica que estas coberturas son las que más favorecen la amenaza de éstos tipos de fenómenos. Por esta razón se debe promover las prácticas agroforestales de las coberturas protectoras.
- Los grandes sectores de amenaza alta y media por movimientos en masa son: sector noroccidental: incluye el corregimiento de Versailles, parte de las veredas La Arcadia, Pitayo, Morroplancho, Las Mercedes, Alto de los Gómez, El Vergel y el Helechal; sector nororiental: Versailles parte oriental cerca al límite con el municipio de Montebello; sector centro por el casco urbano del municipio. Respecto a la amenaza baja por movimientos en masa, se encuentra principalmente en la zona de la parte sur de Santa Bárbara, en la confluencia de la microcuenca de la quebrada La Loma y el río Poblano, y en la desembocadura del río Buey en el río Arma.
- Se observaron procesos erosivos como sobrepastoreo y terracetas, hacia las partes bajas de la zona urbana y en la zona rural en general, con deslizamientos activos, estos procesos se generan por el uso inadecuado del suelo como la ganadería, por las altas precipitaciones y la desprotección de las zonas de altas pendientes.
- Se recomienda principalmente realizar los estudios de amenazas por movimientos en masa con un método estadístico bivariado, ya que como se demostró en el documento,

este método cuantifica cada una de las variables (geología, geomorfología, coberturas, pendientes, relieve relativo, rugosidad y curvatura) en conjunto con la densidad de los movimientos en masa, por lo tanto, este proceso y la calidad de dichas variables, aseguran que los resultados obtenidos sean más exactos y consecuentes con la realidad, los cuales no dependen de la calificación subjetiva de un experto.

### 13. BIBLIOGRAFIA

Barrero, D., Álvarez, J., Kassem, T. 1969. Actividad Ígnea y tectónica de la cordillera Central durante el Mesocenoico. Bol. Geol. Bogotá. 18(1-3): 145-173.

Botero, C. P., & Gómez, J. C. 1991. Geología Ambiental Del Área Urbana Del Municipio De Santa Bárbara, Departamento De Antioquia. Universidad Eafit. Medellín. 88 Pág

Castellanos, E. & Van Westen, C. J. 2008. Qualitative Landslide Susceptibility Assessment by Multicriteria Analysis. Elsevier. Science Direct. Geomorphology. 14 Pág.

Chalkias, C., Ferentinou, M., Polykretis, C. 2014. Gis- Based Landslide Susceptibility Mapping on the Peloponnese Peninsula, Greece. Geosciences Article. 15 Pág.

CORANTIOQUIA, 2002. Mapa Geomorfológico, de amenazas y de áreas degradadas de la Jurisdicción de Corantioquia, a escala 1:100.000. Informe final. 143 Pág.

CORANTIOQUIA - EAFIT. 2015a. Convenio 1502-6. Aunar esfuerzos para realizar los estudios básicos para la delimitación de amenazas naturales y zonificación de áreas con condición de amenaza y riesgo a partir de investigación aplicada en once municipios de la jurisdicción de Corantioquia. Municipio de Entreríos. 271 Pág.

CORANTIOQUIA - EAFIT. 2015b. Convenio 1505-69. Aunar esfuerzos para la actualización del mapa de amenazas 1:100.000 para veintinueve municipios de oficinas territoriales Cartama, Citará, Aburrá Sur y Hevéxicos (parcial), Jurisdicción de Corantioquia.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM. 2010. Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Bogotá D.C. 72p

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI - IGAC. 2007. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Antioquia. Bogotá. 1071 Pág.

INGEOMINAS. 1978. Geología de las hojas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina) del Mapa Geológico de Colombia. Memoria Explicativa. 279 Pág.

INGEOMINAS. 1980a. Geología y Geoquímica de la plancha 166, Jericó. Memoria Explicativa. Escala 1:100.000. 250 Pág.

INGEOMINAS. 1980b. Geología de la plancha 166 Jericó. Escala 1:100.000. Versión Digital (2009)

INGEOMINAS. 1980c. Geología De La Plancha 167 Sonsón. Escala 1:100.000. Versión Digital (2009)

INGEOMINAS – CVC. 2001. Guía Metodológica para la zonificación de amenazas por Fenómenos de Remoción en Masa – Método Univariado - y Escenarios de Riesgo por Avenidas Torrenciales, Convenio 003. Bogotá. 154 Pág.

INGEOMINAS - UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. 2010. Mapa Nacional de Amenaza Sísmica, período de retorno 475 años. Escala 1:1'500.000, Bogotá D.C.

Londoño, J.P. 2006. Evaluación Holística del Riesgo frente a deslizamientos en áreas Urbanas Andinas. Estudio de caso: Manizales. Tesis de Maestría. Universidad Nacional De Colombia, Sede Manizales. 244 Pág.

M. Van Den Eeckhaut, A. Marre,J. 2010. Comparison of two Landslide Susceptibility Assessments in the Champagne–Ardenne. Elsevier. Science Direct. Geomorphology. 15 Pág

Plan Básico De Ordenamiento Territorial (PBOT). 2003. Alcaldía Municipal de Santa Bárbara, Antioquia. Departamento de Antioquia. 336p.

PROYECTO MULTINACIONAL ANDINO: GEOCIENCIAS PARA LAS COMUNIDADES ANDINAS (PMA: GCA). 2007. Movimientos en masa en la Región Andina: una guía para la evaluación de amenazas. Servicio Nacional de Geología y Minería, publicación Geológica Multinacional, No.4, 432p, 1 CD-ROM.

Ruff, M & Czurda, k. 2008. Landslide Susceptibility Analysis with A heuristic approach in the Eastern Alps (Vorarlberg, Austria). Elsevier. Science Direct. Geomorphology. 11 Pág.

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC). 2013. Documento Metodológico de la Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza relativa por Movimientos en Masa. Escala 1:100.000. Bogotá. 158 Pág.

VAN WESTEN, C., 1997. Statistical Landslide Hazard Analysis. Ilwis 2.1 for Windows application guide. Enshede, The Netherlands, ITC Publication N. 15: 73-84.



## ANEXO 1

Tabla 1. Recopilación de información bibliográfica del municipio de Santa Bárbara.

<b>TÍTULO</b>	<b>AÑO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>FUENTE</b>
ESTUDIO GEOLÓGICO EN SANTA BÁRBARA-ANTIOQUIA	1971	Determinación desde el punto de vista geológico de las posibles causas de los daños que presenta el edificio del Liceo Tomás Eastman.	SICAT-SGC
ASENTAMIENTO Y CORRIMIENTO EN EL MUNICIPIO DE SANTA BARBARA- DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA	1973	Estudio de las causas del asentamiento que averió la estructura del liceo Tomás Eastman.	SICAT-SGC
DESLIZAMIENTOS EN EL MUNICIPIO DE SANTA BÁRBARA	1984	Estudio de dos deslizamientos, localizados en la carrera Santander y en el barrio Nazareno, sus principales causas y recomendaciones.	SICAT-SGC
GEOLOGÍA AMBIENTAL DEL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE SANTA BÁRBARA, DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA.	1991	Para el área urbana del municipio de Santa Bárbara, se describen los procesos erosivos como movimientos en masa, erosión superficial, socavación de orillas y excavación de cauces, además se analizan cada una de sus causas principales; sin embargo dichos procesos no se encuentran localizados con las coordenadas geográficas, sino por sectores.	Universidad EAFIT.
PLAN BÁSICO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL (PBOT)	2003	Deslizamientos Activos: se presentan en casi todo el perímetro municipal (relacionados con los drenajes de la zona como quebrada	Alcaldía de Santa Bárbara.

TÍTULO	AÑO	DESCRIPCIÓN	FUENTE
		<p>las Frías, La Loma, La Máquina y Sabaletas, río Poblano).</p> <p>Se presentan movimientos de masa de gran magnitud, como los presentados en la vereda la Arcadia, los chorros y en general la zona limítrofe con el municipio de Fredonia; sector de la quebrada Sabaletas, en límite con el municipio de Montebello: sectores de la primavera; vereda Buenavista, entre otras.</p> <p>El proceso más significativo se presenta en el sector de la variante (Antiguo Liceo Tomás Eastman). Se han observado otros deslizamientos activos en la zona de estudio como el de la parte baja de la cancha del barrio Pío Quinto Rengifo, con una extensión aproximada de 200 m<sup>2</sup>. También al entrar a Damasco se presentan colapsos pequeños de los taludes que soportan la vía y en la carretera terciaria hacia la vereda El Buey.</p>	
PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO BUEY	2005	En el capítulo de Geomorfología, se detallan las unidades de relieve distintivas para la zona de estudio que corresponden a la jurisdicción de los municipios de Montebello y Santa Bárbara. En cada una de estas unidades se describen si se encuentran deslizamientos o caídas de roca, por ejemplo: focos activos de deslizamientos y erosión laminar	CIA

<b>TÍTULO</b>	<b>AÑO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>FUENTE</b>
		y concentrada (surcos, cárcavas pequeñas), etc. Evaluando de esta manera, las amenazas de origen natural para la cuenca del río Buey.	
PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO POBLANCO: INFORME FINAL	2005	Evaluación de la amenaza de origen natural, categorizada desde muy alta hasta baja, causadas por deslizamientos y caídas de rocas, describiendo de manera general dichos procesos en cada una de las unidades de relieve.	CIA
PLAN MUNICIPAL DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES	2012-2015	Descripción de las características de las zonas de amenaza por movimientos en masa y los principales agentes detonantes.  Figuras con el mapa de reclasificación de los procesos erosivos y de movimientos en masa; y con el de la clasificación de amenazas por movimientos en masa de la zona de estudio.	Alcaldía de Santa Bárbara.
ESTUDIO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO Y ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN PARA LA ESTABILIZACIÓN DEL SECTOR LA PALESTINA, MUNICIPIO DE SANTA BÁRBARA, DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA: INFORME FINAL, CORANTIOQUIA	2012	Estudio realizado en el sector La Palestina, sobre la amenaza por inestabilidad de laderas y el riesgo por movimientos de remoción de masas. El deslizamiento más importante de dicha zona, presenta forma de lengüeta con una longitud aproximada de 1 Km, llegando hasta el cauce de la quebrada San José y con dirección aproximada N 75° a 80° E, con un ancho de 50,0 m en su parte superior y hasta de 200,0 m hacia la base.	CIA

Tabla 2. Recopilación de eventos de la base de datos DESINVENTAR del municipio de Santa Bárbara.

<b>EVENTO</b>	<b>FECHA</b>	<b>LOCALIZACIÓN</b>	<b>FUENTE</b>
Deslizamiento	04/05/1974	Vía Medellín-Alto de Minas-La Pintada	DESINVENTAR
	02/10/1974	Vía Versalles-Santa Bárbara- La Albania	
	28/10/1984	Vía Medellín-La Pintada	
	02/11/1984	Vía Medellín-La Pintada La Quiebra km 63	
	17/10/1988	Carretera Caldas - La Pintada	
	01/12/1997	Barrio Sta. Bárbara y Calle Nueva	
	13/07/1998	Vereda Las Mercedes Poblano, Aguatalco	
	31/07/1998	Vereda Las Mercedes	
	30/05/2007	Sectores de Redentón y La Úrsula	
	20/05/2008	Barrio Jesús Nazareno	
	21/05/2008	Barrio Divino Niño - La Galería	
	25/05/2008	Barrio Simón Bolívar	
	12/07/2010	San Isidro parte baja, Quiebra del Barro, los Charcos	

<b>EVENTO</b>	<b>FECHA</b>	<b>LOCALIZACIÓN</b>	<b>FUENTE</b>
	27/09/2010	Santander Palestina Reventón Helechal	
	27/10/2010	El Vergel, San Isidro	
	29/10/2010	Vía Principal	
	23/11/2010	La Arcadia	
	02/12/2010	El Guayabo la Planta Palestina	
	25/05/2011	San Isidro	
	06/07/2011	Damasco	
Avenida Torrencial	20/12/2011	Vía a Fredonia	
Deslizamiento	20/12/2011	La Liboriana	
	20/12/2011	Versalles (la Verraquera)	
	20/12/2011	San Isidro (La Juliana)	
	20/12/2011	San Isidro (La vieja Recova)	
	20/12/2011	Vereda Poblano	
	20/12/2011	Vía Buena Vista	
	20/12/2011	Vereda El Guayabo (Las Mercedes)	

Tabla 3. Recopilación de eventos de la base de datos SIMMA del municipio de Santa Bárbara.

<b>CODIGO</b>	<b>LATITUD</b>	<b>LONGITUD</b>	<b>TIPO</b>	<b>SUBTIPO</b>	<b>FECHA</b>
---------------	----------------	-----------------	-------------	----------------	--------------

12068	5,87522715	-75,5776409	Movimiento en Masa Catálogo	Deslizamiento	03/05/1942
11762	5,883274915	-75,5166202	Movimiento en Masa Catálogo	Deslizamiento	14/11/1942
11223	5,863284313	-75,6189578	Movimiento en Masa Catálogo	Deslizamiento	01/06/1944
6662	5,869348675	-75,5638419	Flujo	Flujo sin Clasificación	19/06/1944
8702	5,881231362	-75,5441825	Movimiento en Masa Catálogo	Deslizamiento	04/11/1970
9809	5,867382133	-75,5618677	Movimiento en Masa Catálogo	Deslizamiento	02/09/1971
37	5,879619444	-75,5692611	Flujo	Avalancha de Detritos	16/11/1973
6663	5,881168785	-75,5678114	Flujo	Flujo sin Clasificación	01/03/1974
1813	5,881174038	-75,5658424	Flujo	Flujo sin Clasificación	13/04/1982
1814	5,857523278	-75,5618416	Flujo	Flujo sin Clasificación	02/11/1984
3314	5,8890453	-75,5717706	Movimiento en Masa Catálogo	Deslizamiento	23/12/1993



3689	5,855664511	-75,5185184	Movimiento en Masa Catálogo	Deslizamiento	27/12/1995
5471	5,889013511	-75,5835851	Movimiento en Masa Catálogo	Deslizamiento	01/10/2000
6664	5,873271215	-75,5717285	Caída	Caída de Roca	11/04/2005
7019	5,83388273	-75,5539036	Movimiento en Masa Catálogo	Deslizamiento	13/05/2005
6665	5,879217984	-75,5599299	Movimiento en Masa Catálogo	Deslizamiento	13/05/2005
7425	5,85948983	-75,5638158	Movimiento en Masa Catálogo	Deslizamiento	13/11/2005
8065	5,847741726	-75,5322811	Movimiento en Masa Catálogo	Deslizamiento	19/04/2006
6666	5,875295278	-75,5520433	Movimiento en Masa Catálogo	Deslizamiento	19/04/2006
30788	5,9125	-75,5575	Flujo	Crecida de Detritos	01/06/2010
30788	5,9125	-75,5575	Flujo	Crecida de Detritos	01/06/2010
30788	5,9125	-75,5575	Deslizamiento	Deslizamiento Traslacional	02/06/2010

30854	5,968333333	-75,6061111	Deslizamiento	Deslizamiento Traslacional	18/08/2010
15979	5,874444444	-75,5669444	Movimiento en Masa Catálogo	Deslizamiento	26/09/2010
15980	5,874444444	-75,5669444	Movimiento en Masa Catálogo	Deslizamiento	21/11/2010
30857	5,991666667	-75,6147222	Deslizamiento	Deslizamiento Traslacional	04/07/2011
30857	5,991666667	-75,6147222	Caída	Caída de Roca	04/07/2011
30856	5,976111111	-75,5894444	Deslizamiento	Deslizamiento Traslacional	04/07/2011
30860	5,946944444	-75,5794444	Caída	Caída de Roca	14/09/2011
31335	5,875833333	-75,5663889	Movimiento en Masa Catálogo	Deslizamiento	14/02/2015